

UNIVERSITA' DI PISA
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Civile

Indirizzo Idraulica

TESI DI LAUREA

**“Analisi sperimentale degli scavi in bacini
a larghezza variabile”**

Candidato:

Andrea Quiriconi

Relatori : **Prof. Ing. Stefano Pagliara**

Prof. Ing. Maurizio Venutelli

Anno accademico 2006-2007

*Ai miei genitori,
Claudio e Teresa*

“Quando voi potete misurare ed esprimere in numeri ciò di cui state parlando, ne sapete effettivamente qualcosa; ma quando non vi è possibile esprimere in numeri l’oggetto della vostra indagine, insoddisfacente ne è la vostra conoscenza”

Lord Kelvin (W. Thomson)

Indice

1. Introduzione

1.1 premessa	pag.	1
1.2 Sistemazioni fluviali	pag.	2
1.3 Rampe in Pietrame	pag.	8
1.4 Descrizione del processo di scavo	pag.	10
1.5 Funzionamento idraulico delle rampe	pag.	11
1.6 Rialto idraulico	pag.	15

2. Descrizione apparati sperimentali

2.1 Descrizione del canale modello	pag.	18
2.2 Modalità di esecuzione delle prove	pag.	21
2.3 Caratterizzazione dei materiali	pag.	24
2.3.1 Peso Specifico	pag.	24
2.3.2 Dimensione	pag.	25
2.3.3 Forma	pag.	27
2.4 Materiali e Modello Asimmetrico	pag.	30
2.5 Materiali e Modello Simmetrico	pag.	31
2.6 Materiali costituenti le rampe	pag.	33
2.7 Materiali costituenti il fondo mobile	pag.	35

3. Definizione delle variabili

3.1 Parametri idrodinamici influenti	pag.	45
--------------------------------------	------	----

4. Descrizione del fenomeno di scavo in funzione dell'allargamento

4.1 Premessa	pag.	51
4.2 Evoluzione del processo di scavo (allargamento asimmetrico)	pag.	53
4.3 Evoluzione del processo di scavo (allargamento simmetrico)	pag.	59

5. Elaborazioni dati sperimentali

5.1	Premessa ai risultati sperimentali	pag. 70
5.2	Relazione $(Z_{\max}+h_0/h_1), F_{d90}$	pag. 74
5.3	Relazione $Z_{\max}/Z_m, F_{d90}$	pag. 87
5.4	Relazione L_0, Z_{\max}	pag. 91
5.5	Relazione Z_M, Z_{\max}	pag. 99
5.6	Relazione Z_M/Z_{MM}	pag. 101
5.7.	Analisi profili di scavo longitudinali	pag. 103
5.7.1	Andamento longitudinale dello scavo $Z(x)$	pag. 104
5.7.2	Calcolo dei volumi di scavo	pag. 107
5.8.	Analisi sezioni di massimo scavo	
5.8.1	Misura angolo attrito interno	pag. 111
5.8.2	Andamento della sezione di massimo scavo $f(\lambda)$	pag. 112
5.8.3	Analisi grafica della sezione di massimo scavo	pag. 118

6. Confronto con alcune formule di letteratura

6.1	Premessa	pag. 121
6.2	Confronto Altri Autori	pag. 122

7. Conclusioni pag. 127

Ringraziamenti

Legenda

Legenda Relazioni

Bibliografia

Appendice – Misurazioni Sperimentali

1. Introduzione

1.1 premessa

Nel corso di questo secolo con il notevole sviluppo tecnologico legato ai rilevanti progressi scientifici si è registrato un notevole miglioramento socio-economico che ha innescato, con l'incremento della presenza antropica sul territorio, forti processi di urbanizzazione, industrializzazione e sfruttamento del territorio stesso.

Tutto questo ha prodotto una radicale trasformazione dell'uso del suolo, a cui si associa un sensibile aumento dell'impatto sullo stesso che può portare inevitabilmente a situazioni di squilibrio eco-ambientali in molti casi irreversibili.

Casi evidenti sono ad esempio la realizzazione di una sempre più complessa e capillare rete viaria con il conseguente aumento di percentuale di territorio coperto, che si traduce in una maggiore quantità di acqua che ruscella anziché infiltrarsi nel suolo, mandando spesso in crisi i sistemi di scolo delle acque, dalle fognature agli alvei dei fiumi; la sistematica riduzione degli ambiti fluviali e l'eccessiva regimazione delle acque, porta inevitabilmente alla realizzazione di onerosi interventi di protezione dalle piene che, purtroppo non sempre bastano ad evitare grossi disastri, come testimoniato dalle cronache degli ultimi anni; il disboscamento di grandi zone da destinare all'agricoltura oppure la crescente urbanizzazione dovuta all'espansione dei centri urbani.

Analizzando queste considerazioni si evince la necessità di una nuova filosofia di sviluppo compatibile con il sistema ambientale in cui l'uomo vive, quindi filosofia che porti ad una politica di intervento tendente al recupero degli ambienti naturali degradati ed a una maggiore attenzione alla progettazione dei nuovi ambienti.

Sotto questo aspetto l'opera dei progettisti, che spesso intervengono in ambiti naturali di notevole pregio, è sempre più di maggiore responsabilità quindi imprescindibile dal trascurare la valenza tecnica ma anche estetica ed ambientale dell'opera.

L'insieme degli elementi in gioco è la nuova sfida a cui il progettista deve adempiere conciliando le esigenze tecnico-progettuali dell'opera da realizzare, con quelle ambientali in cui l'opera stessa dovrà calarsi, cercando di realizzare una nuova metodologia di progettazione che porta alla collaborazione di un gruppo di professionisti oltre che di nuove informazioni progettuali ricavabili esclusivamente da esperienze.

1.2 Sistemazioni fluviali

Nelle sistemazioni dei corsi d'acqua è frequente la necessità di tenere sotto controllo la naturale tendenza evolutiva della morfologia dell'alveo e, spesso, la stabilità altimetrica è ricercata attraverso l'inserimento di briglie, che costituiscono una serie di sbarramenti.

Subito dopo la realizzazione di tali manufatti, si crea una serie di invasi che, con il passare del tempo, vengono colmati dal materiale solido trasportato dalla corrente e depositato a monte dello sbarramento.

Il profilo assunto dal fondo dell'alveo ha andamento a gradoni, come mostrato nella figura 1.1.1 a), caratterizzato da una serie di piani che vanno dal piede di una briglia a monte alla sommità di quella successiva a valle.

Uno dei principali svantaggi conseguenti alla realizzazione delle briglie, oltre al notevole impatto visivo, è l'interrimento a monte del manufatto e la conseguente erosione al piede; tale fenomeno si verifica in quanto la capacità di trasporto della corrente nel tratto vallivo risulta maggiore del materiale disponibile, essendo stata trattenuta a monte della briglia gran parte dei sedimenti.

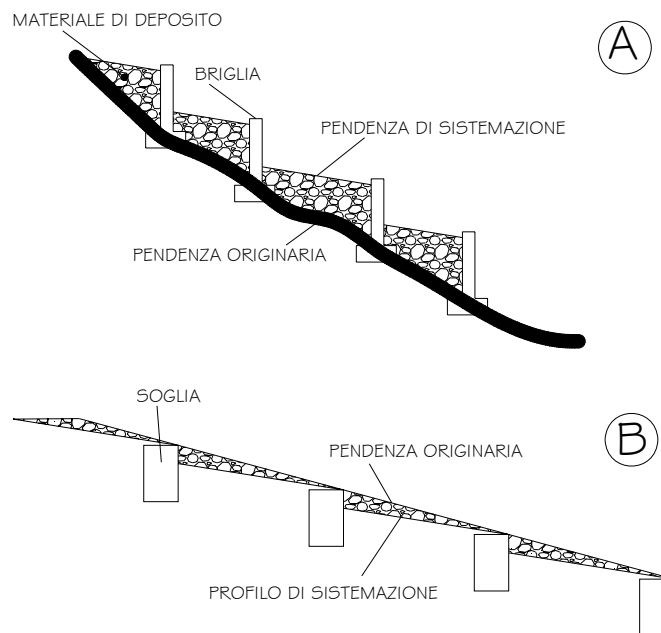


Fig. 1.1.1 Sistemazione con briglie a) e con soglie b).

Una seconda metodologia di intervento per la sistemazione dei corsi d'acqua consiste nell'inserimento di soglie.

A differenza delle briglie, che emergono molto dall'alveo, le soglie sono strutture di modesta altezza e non sporgono sensibilmente dal fondo; mediante un processo di erosione controllata, che aumenta dalla testa di una soglia al piede della soglia a monte, esse permettono di raggiungere la pendenza di sistemazione.

Le soglie devono essere fondate abbastanza profondamente per fare fronte all'erosione prevista e evitare pericoli di scalzamento del manufatto stesso.

Il profilo assunto dall'alveo, schematizzato nella fig. 1.1.1 b), è simile all'andamento a gradoni ma presenta salti di minore entità.

La figura 1.1.2 rappresenta una soglia vista dall'alto:



Fig. 1.1.2 vista aerea soglia

A monte dello sbarramento, l'alveo diventa un materasso ciottoloso, piatto e uniforme, e vengono dunque ridotte le diversità ambientali e biologiche che costituiscono una condizione fondamentale affinché in un corso d'acqua possa insediarsi e perdurare un'equilibrata comunità di organismi viventi.

La briglia inoltre costituisce un ostacolo alla risalita della fauna ittica, che viene così frammentata in tante popolazioni isolate dal punto di vista riproduttivo.

In particolare per la fauna ittica è essenziale che l'habitat si differenzi per consentire le diverse attività vitali quali l'alimentazione, la riproduzione, il riposo; ognuna di queste attività necessita di un particolare ambiente.

Ciascuna specie ha esigenze particolari ma, in generale, le specie d'acqua corrente utilizzano le buche (pool) come aree di rifugio e di sosta, i raschi (riffle) come zone di alimentazione mentre le zone con caratteristiche intermedie (run) sono quelle più idonee alla riproduzione. I pesci di una stessa specie utilizzano zone diverse in relazione all'età; i pesci più grossi preferiscono buche profonde mentre quelli più giovani si localizzano in zone più ristrette.

La diversità ambientale è espressa dalla sequenza buche-raschi, dalla varietà granulometrica del substrato, dalla sinuosità dell'alveo e dalla presenza di meandri.

Gli interventi di sistemazione dell'alveo non devono quindi annullare la diversificazione ambientale che costituisce la base della biodiversità.

Per questi motivi la creazione di briglie deve essere preceduta da un'attenta analisi sulla loro effettiva necessità, valutando attentamente se è possibile coniugare la presenza delle medesime con l'apporto di materiale a valle dell'alveo e il ripascimento del litorale.

Nel caso di interventi su briglie già esistenti è opportuno considerare di intervenire con un loro progressivo adeguamento strutturale.

Qualora le briglie risultino necessarie, ad esempio per proteggere un ponte dallo scalzamento, si può tenere in considerazione che lo scalino tra monte e valle può essere realizzato gradualmente su una distanza maggiore anziché con un brusco dislivello come nelle opere tradizionali in calcestruzzo.

Una metodologia di intervento consiste nel collocare pietrame a valle della briglia e nell'eventuale riduzione dell'altezza di questa in modo da raccordare meglio il manufatto con i massi. Nella figure 1.1.4 è rappresentata la transizione concettuale dalla briglia tradizionale in calcestruzzo (a) a quella a massi sparsi (c).

Il primo passo è la realizzazione di uno scivolo di massi a valle della briglia che ha lo scopo di proteggere l'opera dallo scalzamento, di dissipare energia e favorire la risalita dei pesci (b). Infine nell'esempio (c) si osserva che anche la briglia stessa può essere realizzata in pietrame in modo da coprire il dislivello di progetto in un tratto più lungo anziché con un unico salto come nel caso (a).



Fig 1.1.3 allargamento laterale briglia per risalita fauna ittica

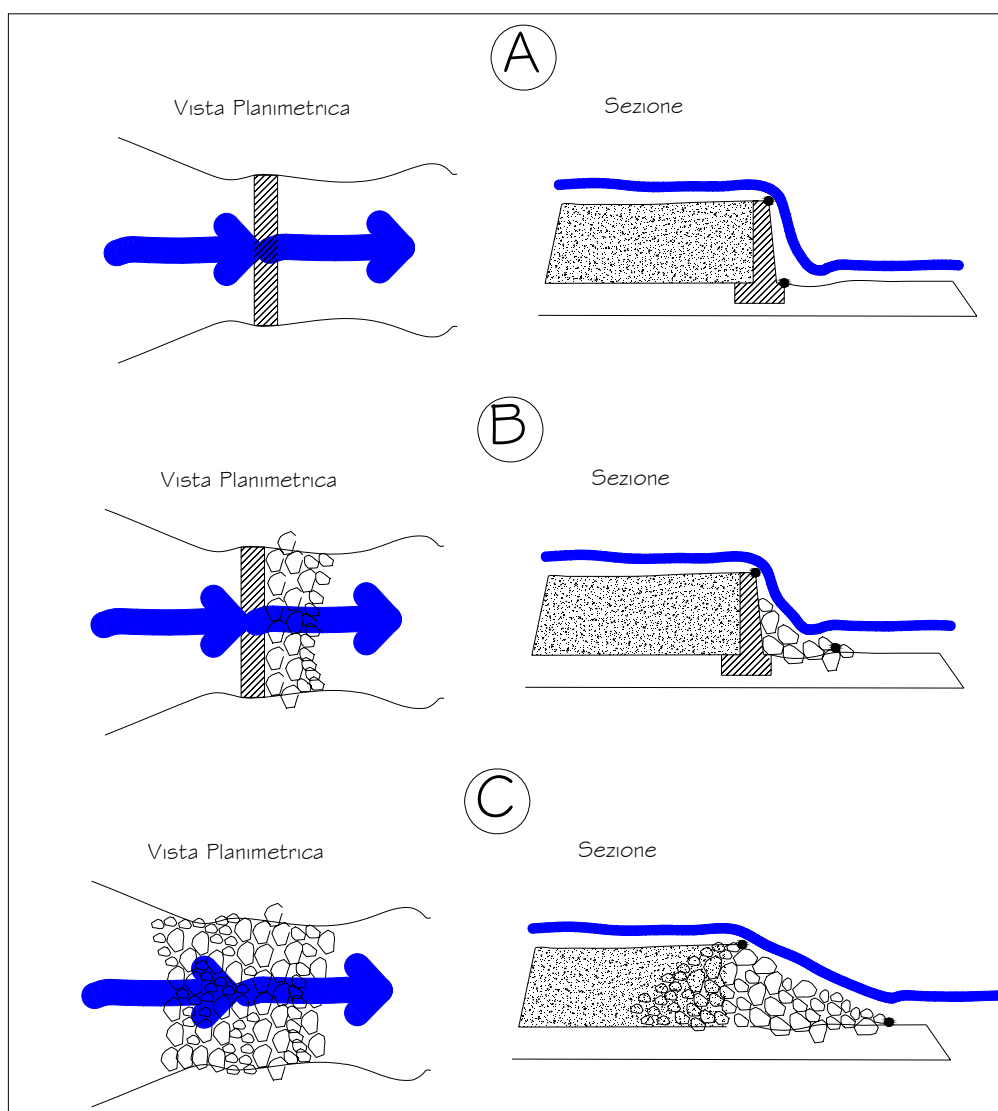


Fig 1.1.4 Transizione concettuale da briglia tradizionale a rampa.

Il dislivello tra il fondo dell'alveo a monte e a valle della struttura, rappresentato in figura dai puntini neri, viene realizzato in maniera graduale su una distanza maggiore, anziché con un unico salto come nella figura a). Alla forte turbolenza dovuta alla scabrezza diffusa per la presenza di massi sparsi si deve la dissipazione di energia.

La differenza concettuale e sostanziale tra un'opera in pietrame e una struttura tradizionale in calcestruzzo armato è l'idea di riconoscere ai massi la capacità di riprodurre la morfologia dell'alveo e di riproporre la naturale e ritmica variazione delle condizioni ambientali, della velocità e del tirante idrico.



Fig 1.1.5 rampa in pietrame

Le due foto di fig 1.1.6 di seguito mostrano la situazione prima e dopo la realizzazione di una rampa in pietrame (torrente Sellustra, comune di Dozza, Bo).





Fig. 1.1.6 Rampa in pietrame realizzata in Val Sellustra, comune di Dozza (Bo).

1.3 Rampe in pietrame

Le rampe in massi sono opere impiegate per dissipare energia e assicurare contemporaneamente la stabilità del letto dell'alveo; possono essere impiegate in alternativa alle tradizionali opere di sistemazione fluviale rispetto alle quali hanno il vantaggio di non interrompere la continuità morfologica dell'alveo.

Per i motivi descritti nel precedente paragrafo, è auspicabile riconvertire le briglie tradizionali in rampe in pietrame, trasformando il salto di fondo, che si verifica nelle briglie, in un tratto ripido.

Nella figura 1.3.1 è riportata la foto di una rampa in pietrame.



Fig. 1.3.1 Rampa a blocchi (affluente F.Rodano Francia).

Il profilo altimetrico dell'alveo risulta così essere non più a gradoni ma costituito da tratti a diversa pendenza.

Il loro principale scopo consiste nella riduzione della forza erosiva della corrente grazie alla diminuzione della pendenza longitudinale del profilo nei tratti a monte della rampa.

Può avere anche il compito di ripristinare la continuità morfologica del corso d'acqua e la creazione di un passaggio per i pesci.

Mediante le rampe si evita la presenza di barriere verticali insormontabili e si elimina l'isolamento riproduttivo tra le specie ittiche fluviali; nel contempo è, però, in ogni modo soddisfatta l'esigenza di ridurre la forza erosiva della corrente, la cui energia viene dissipata nel turbolento deflusso attraverso la rampa con elevata scabrezza.

Le rampe hanno modesta altezza, non superiore ai 2-3 m, sono costituite da una scogliera con massi di grossa pezzatura e vengono realizzate in alvei con pendenza variabile dal 10% (corsi d'acqua di tipo fluviale) al 30-40% (corsi d'acqua torrentizi).

I massi impiegati hanno dimensioni variabili tra 0,4-1m ; per aumentarne la stabilità possono essere utilizzati pali in legno, tondini di acciaio o putrelle di dimensioni tali da garantire l'ancoraggio dei massi.

Gli accorgimenti costruttivi consistono nell'utilizzare massi di diversa dimensione e la solida infissione di quelli ciclopici al fondo, nel rafforzamento con pali infissi, nella posa in ordine disomogeneo del pietrame, in modo da creare spazi vuoti che consentano l'alternanza di zone a diversa intensità di corrente, mantenendo una maggiore altezza verso le sponde, al fine di proteggerle dall'erosione e indirizzare le portate di magra verso il centro dell'alveo.



Fig. 1.3.2 Deterioramento di rampa in pietrame

1.4. Descrizione del processo di scavo

Le ragioni dei numerosi studi sperimentali sull'erosione creata da parte di una vena liquida che impatta ad elevate velocità su un fondo mobile sono legate alla stabilità strutturale delle opere costruite negli alvei.

L'inserimento di una struttura trasversale in un alveo deve essere preceduto, per non comprometterne la stabilità, da una rigorosa valutazione e dall'analisi dell'evoluzione morfologica dell'alveo.

In mancanza di un'analisi del presunto scavo del fondo si possono inserire opere di difesa del manufatto; tale metodo costituisce però un sovradimensionamento dei manufatti accessori alla struttura idraulica e dunque un aumento dei costi e dell'impatto ambientale. Nasce dunque l'esigenza di eseguire analisi sperimentali su modelli in scala ridotta finalizzati a ricavare formule empiriche.

L'evoluzione del processo di scavo può essere suddivisa nelle seguenti fasi:

- 1) Il getto presenta una forte azione erosiva che si dissipa sul fondo mediante la formazione di vortici con conseguente scalzamento; le azioni tangenziali, derivanti dalle elevate velocità, superano i valori limite del moto incipiente.
- 2) Oltre ad un rapido approfondimento, si verifica un aumento delle dimensioni in pianta dello scavo. Tali grandezze aumentano proporzionalmente, pertanto la forma dello scavo resta pressoché invariata, ovvero si trasforma omoteticamente.
- 3) Con l'aumento dello scavo cresce il cuscino d'acqua al suo interno che provvede alla sua protezione e dunque diminuiscono le azioni tangenziali al fondo.
- 4) Si raggiunge la condizione di equilibrio quando le tensioni tangenziali al fondo raggiungono il valore critico del materiale di fondo.

1.5 Funzionamento idraulico delle rampe

Da un punto di vista idraulico, le rampe possono essere schematizzate mediante un tratto a forte pendenza preceduto e seguito da uno a debole pendenza.

In corrispondenza della sezione d'ingresso della rampa in genere si verifica l'altezza critica mentre nella sezione terminale a valle della rampa si ha la formazione del risalto idraulico.

Spesso la pendenza della rampa è molto maggiore della pendenza del fondo dell'alveo e dunque la corrente al piede del manufatto ha velocità superiori a quella che si determina nel tronco a valle ed a meno che non si indaghino le caratteristiche dello scavo, sarà necessario inserirvi un manufatto di dissipazione.

Qualora la pendenza della rampa sia confrontabile con quella dell'alveo, la velocità al piede è paragonabile a quella della corrente a valle per cui nella zona di transizione della rampa può essere protetta mediante un semplice rivestimento di massi.

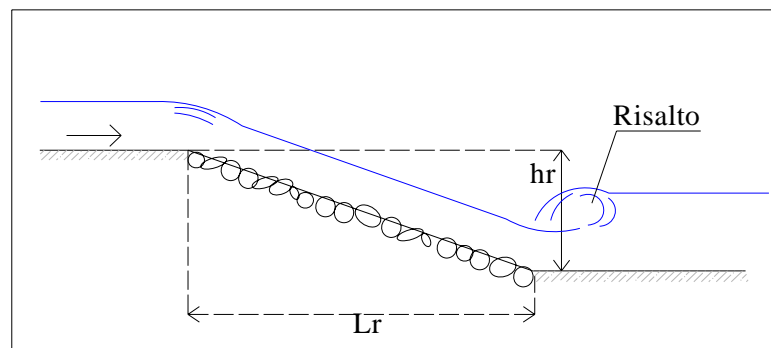


Fig 1.4.1 Schema di rampa in pietrame e risalto idraulico.

Il risalto idraulico si manifesta quando la corrente passa dallo stato ipercritico a quello subcritico; nel primo caso dominano le forze d'inerzia, nel secondo le forze di gravità.

Nella transizione tra i due regimi di moto, la corrente di monte subisce un'espansione improvvisa trasformando una parte dell'energia cinetica in energia potenziale e dissipando la rimanente parte in calore mediante lo sviluppo di vortici, turbolenze e moti secondari.

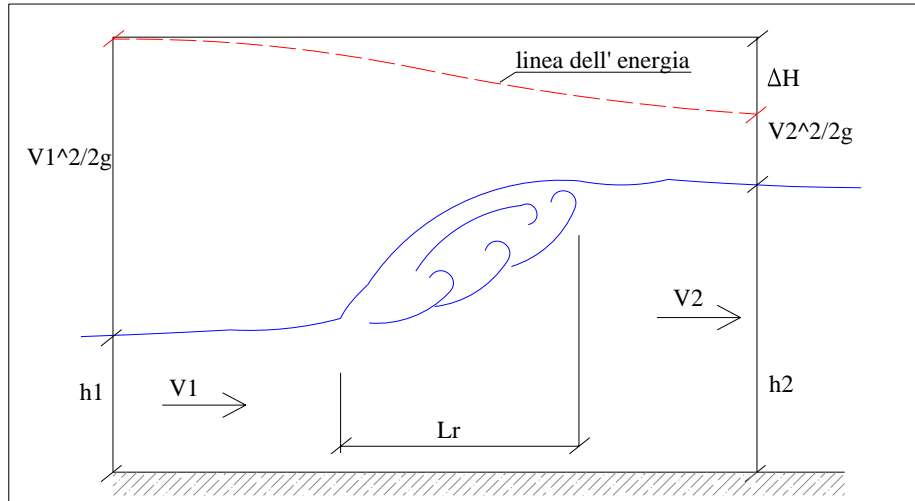


Fig 1.4.2 Schema del risalto idraulico.

h_1 = altezza coniugata di monte

h_2 = altezza coniugata di valle

V_1 = velocità media di monte

V_2 = velocità media di valle

L_r = lunghezza del risalto

ΔH = perdita di energia

La situazione migliore, in cui si realizza il massimo rendimento del manufatto, si ottiene quando si verifica il caso a) di fig 1.4.3, con formazione di salto subito a valle della rampa.

Quando l'altezza di monte decresce si ricade nei casi intermedi b) (presenza di un roller superficiale) e c) (salto ondulato), fino ad arrivare alla situazione di corrente lenta anche sulla rampa, come è mostrato nel caso d).

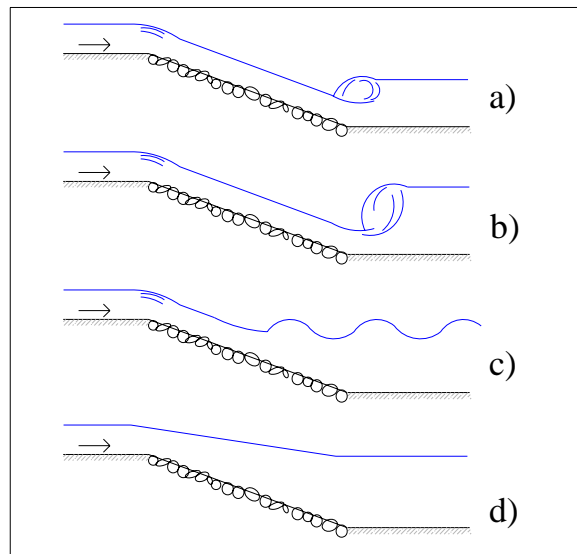


Fig 1.4.3 Schema delle configurazioni del pelo libero.

Il risalto può distinguersi in :

- Risalto libero (free Jump)
- Risalto annegato (submerged jump)

Si dice annegato quando il roller sommerge completamente la sezione in corrente veloce ai piedi del risalto.

Negli altri casi parliamo di risalto libero di cui possiamo fornire una classificazione in funzione del numero di Froude di monte, in accordo con quanto proposto dall'Ente Americano (U.S.R.B.R.), sulla base di studi effettuati da Bradley e Peterka e ritenuti validi dalla maggior parte degli studiosi. Si riporta di seguito la classificazione:

a) risalto stabile $Fr = 4,5 - 9,0$ Il roller è completamente sviluppato; le oscillazioni delle componenti verticali della velocità tendono a scomparire e il profilo di valle tende all'orizzontale.

b) risalto oscillante $Fr = 2,5 - 4,5$; si nota la formazione del roller e la presenza di un campo di velocità con componenti verticali oscillanti.

c) risalto ondulare $Fr = 1 - 1,7$; si presenta con una serie di piccole ondulazioni del pelo libero che si smorzano verso valle.

d) assenza di risalto

1.6 Risalto idraulico

Il deflusso dell'acqua in alveo naturale o in canale artificiale può avvenire in condizioni distinte a seconda che la corrente sia :

- Veloce o supercritica ($Fr > 1$)
- Lenta o subcritica ($Fr < 1$)

Proprio nella zona di transizione tra la corrente veloce e quella lenta si genera il fenomeno del risalto idraulico.

Parliamo di risalto classico quando esso avviene in un canale artificiale rettangolare, con fondo liscio, orizzontale e di lunghezza opportuna.

Il risalto si manifesta con un brusco innalzamento della superficie libera della corrente, associato alla formazione di un vortice ad asse orizzontale detto roller, che provoca una turbolenza ed aerazione con forte dissipazione dell'energia meccanica della corrente in calore.

Proprio per queste sue caratteristiche, il risalto trova molteplici campi di applicazione:

- Dissipatori di energia a valle di opere idrauliche;
- Misurazioni di portate
- Mescolamento di gas e liquidi in processi chimici
- Aerazione delle correnti interessate da apporto di sostanze inquinanti.

Nella figura 1.4.2. si sono evidenziate le grandezze fondamentali che caratterizzano il risalto la cui metodologia di calcolo è basata sull'analisi analitica del cosiddetto VC (volume di controllo) che contiene completamente il roller.

Facendo riferimento all'equazione globale del moto :

$$G + M + P + I = 0$$

Nella quale :

- G è la risultante delle forze di massa
- M è il flusso della quantità di moto

- P è la risultante delle forze di pressione
- I è la risultante delle inerzie locali

Applichiamo le seguenti ipotesi semplificative :

- Perdite di carico nulle
- Alveo orizzontale
- Fenomeno stazionario
- Sezione rettangolare

Sotto queste ipotesi il teorema globale del moto si riduce alla seguente espressione:

$$P_1 - P_2 + M_1 - M_2 = 0$$

Imponendo inoltre in corrispondenza delle sezioni 1 e 2:

- Distribuzione idrostatica delle pressioni
- Distribuzione uniforme delle velocità

Possiamo scrivere :

$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot y_1^2 + \frac{Q^2}{g \cdot b \cdot y_1} = \frac{1}{2} \cdot b \cdot y_2^2 + \frac{Q^2}{g \cdot b \cdot y_2} \quad (1)$$

Che equivale a dire che la spinta totale di monte (Stm) è uguale alla spinta totale di valle (Stv) dove :

$$Stm = \frac{1}{2} \cdot b \cdot y_1^2 + \frac{Q^2}{g \cdot b \cdot y_1} \quad (2)$$

$$Stv = \frac{1}{2} \cdot b \cdot y_2^2 + \frac{Q^2}{g \cdot b \cdot y_2} \quad (3)$$

Il verificarsi dell'equazione (1) ci dà indicazioni sulla localizzazione del risalto, anche se dobbiamo sempre tenere conto dei fenomeni di instabilità insiti nel medesimo.

Sviluppando l'equazione (1), si ricava l'importante formula di Belanger che chiarisce il legame tra altezze coniugate e il numero di Froude di monte :

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \cdot \left[-1 + \sqrt{1 + 8F_1^2} \right]$$

Possiamo ricavare inoltre la perdita di energia dovuta al risalto.

Indicando con E_1 l'energia totale di monte e con E_2 l'energia totale di valle, otteniamo che $\Delta H = E_1 - E_2$, ovvero la dissipazione di energia dovuta al risalto.

L'efficienza η rappresenta quanta energia il roller è in grado di dissipare rispetto a quella totale.

Essa risulta essere uguale a:

$$\eta = \Delta H / E_1$$

2. Descrizione apparati sperimentali

2.1 Descrizione del canale modello

Le esperienze sperimentali sono state eseguite presso il laboratorio di idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa utilizzando un modello realizzato nel canale denominato 1-C.



Fig. 2.1.1 canale 1.c laboratorio di idraulica

Il canale presenta una sezione rettangolare le cui pareti sono realizzate in vetro mentre il fondo è ricoperto in lamiera di acciaio, in cui si è realizzata una vasca di calma iniziale ed una vasca finale di deflusso all'interno di una vasca di raccolta in modo da realizzare un circuito chiuso (Figura 3.1.1).

La sezione rettangolare del modello ha larghezza 35 cm, altezza 50 cm mentre il canale raggiunge la lunghezza di 6m.

L'acqua viene messa in circolo mediante una pompa, collegata attraverso una condotta di aspirazione, ad una vasca di raccolta posta a valle del canale.

Il canale è munito di due paratoie, quella di monte viene utilizzata per ridurre la turbolenza, quella di valle per regolare il livello idrico.

Al termine del canale è presente una vasca di calma quadrata, di dimensioni 1,5x1,5m ed altezza 1,2m.

La tubazione adduttrice, in P.V.C. con diametro 80mm, attinge dalla vasca a valle, le portate vengono misurate con un misuratore di portata di tipo magnetico regolato da due valvole a saracinesca poste nei pressi della vasca di calma di valle.



Fig. 2.1.2 misuratore di portata

La pompa è del tipo ad asse orizzontale, ha una potenza di 7,5 KW e riesce a raggiungere portate fino a 28 l/s .

All'interno di questo circuito chiuso si è realizzato, attraverso la giunzione di lamiera in acciaio dello spessore di 2mm, una vasca di calma nella parte iniziale collegata alla rampa in pietrame realizzata attraverso l'incollaggio con adesivi siliconici delle pietre della granulometria scelta per la prova . Le pendenze della rampa sono state cambiate di volta in volta mantenendo invariata la lunghezza della rampa stessa. La parte terminale della rampa è collegata al fondo mobile di valle in cui si è impostato, attraverso il posizionamento di due pareti mobili in lamiera, il tipo di allargamento da analizzare. Oltre il fondo mobile vi è un cassone in lamiera che ha la funzione di facilitare le condizioni di moto rettilineo uniforme di valle.

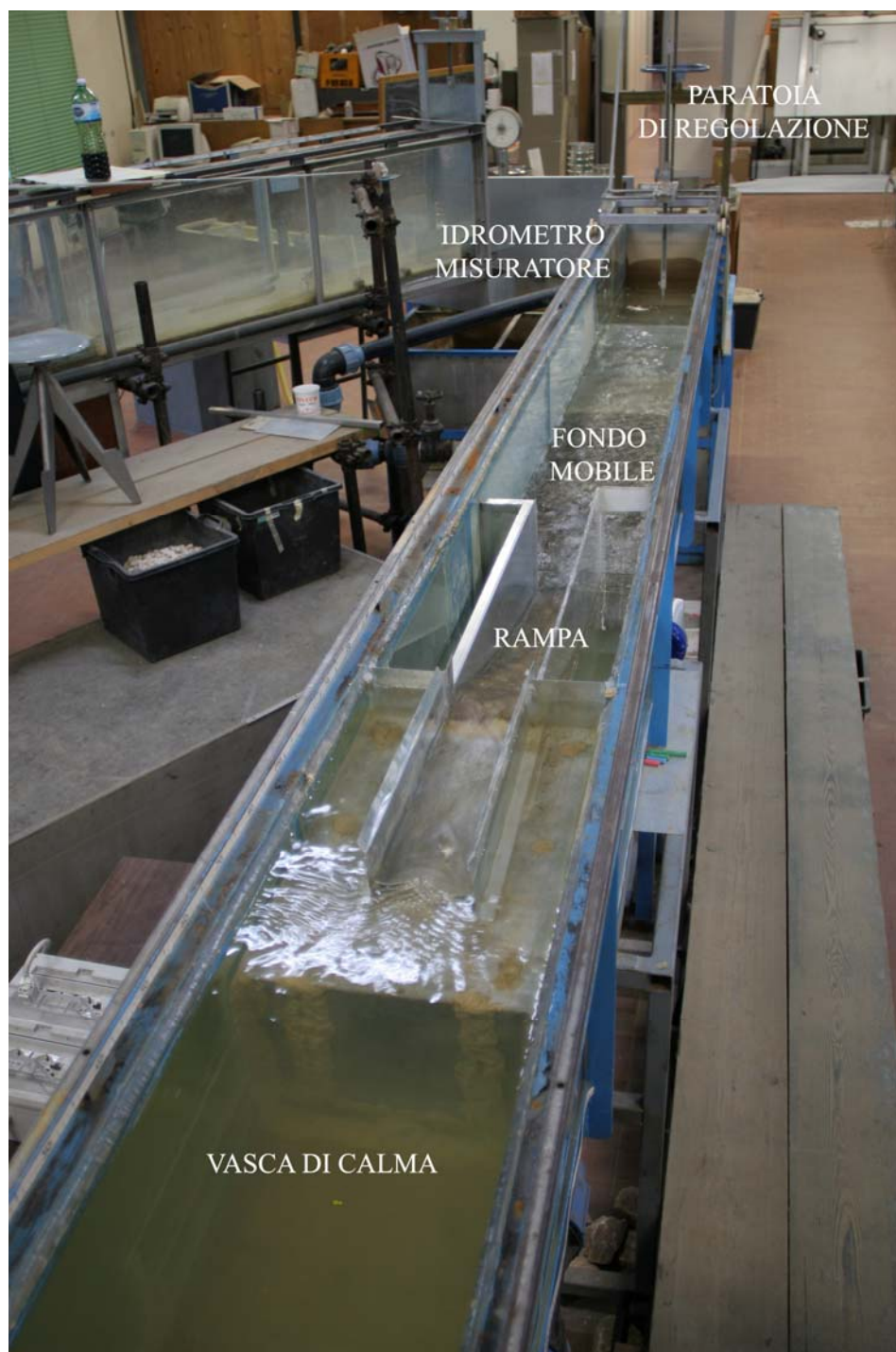


Fig. 2.1.3 Modello 2

2.2 Modalità di esecuzione delle prove

In riferimento al modello sopra descritto, la generica prova aveva inizio con il rilevamento del fondo mobile a secco, opportunamente livellato in maniera da non creare discontinuità del profilo altimetrico nel passaggio rampa-fondo mobile. Le sezioni di misura in senso longitudinale sono state scelte a distanze medie variabili nell'intorno dei 5 cm , intensificando con distanze di 1 cm nelle zone maggiormente interessate dallo scavo. Trasversalmente sono stati misurati da tre a undici punti in funzione della configurazione di allargamento del canale e della profondità dello scavo. In questo modo è stato possibile avere un rilievo fedele del fondo mobile su tutto il bacino di dissipazione. La scelta delle aree di competenza relative ai punti di misura erano imposte come spiegato di seguito.

Si è diviso idealmente il canale in due parti simmetriche rispetto al proprio asse longitudinale. Ogni misura è stata presa in modo simmetrico all'asse longitudinale del canale e successivamente mediata in modo da poter velocemente individuare la sezione trasversale di massimo scavo. Sono state quindi eseguite alcune prove di tentativo per individuare la portata minima, corrispondente all'inizio della perturbazione del fondo mobile, e quella massima relativa al raggiungimento della condizione di trasporto. Ovviamente questa fase preliminare di individuazione del range utile di portata rimane valida fino a che non vengono variati i seguenti parametri:

- rapporto allargamento canale rispetto alla rampa
- pendenza della rampa
- scabrezza della rampa

Una volta rilevati i valori estremi di portata, ne sono stati scelti ed indagati alcuni valori intermedi. La generica prova iniziava quindi con il posizionamento di un lamierino a protezione del fondo mobile in modo da evitare lo scavo da parte del deflusso iniziale sulla rampa. Impostato il valore esatto della portata attraverso la regolazione delle saracinesche e la lettura del valore cercato sul misuratore di portata si procede con particolare cura al sollevamento del lamierino in modo da non alterare le condizioni iniziali del fondo mobile. Prima di procedere alla misurazione del profilo liquido attraverso la lettura sull'idrometro si è sempre atteso un tempo di stabilizzazione dello scavo che mediamente oscilla tra i 35 e 45 minuti. La stabilizzazione si considera tale quando non si hanno più avanzamenti del piede a valle della duna. I tempi di attesa sono stati molto variabili, principalmente in funzione della portata e della pendenza della rampa; i tempi più lunghi hanno riguardato le alte portate con le elevate pendenze della rampa.

Una volta stabilizzatosi lo scavo si è proceduto al rilievo del profilo liquido. L'operazione successiva consiste nel far fuoriuscire lentamente l'acqua dal canale in modo da poter, una volta svuotato, misurare le quote del fondo mobile reso secco.

Per ogni prova i punti di misura all'interno del canale erano così soggetti a due rilievi, il primo del livello idrico e successivamente di quello del fondo, sia fisso sulla rampa che mobile a valle di essa. L'interasse fra le sezioni di misura longitudinali è costante per quanto riguarda la rampa mentre è variabile lungo la parte di canale occupata dal fondo mobile, con infittimento delle misure nelle zone di maggiore scavo. Trasversalmente è stato eseguito un rilievo del profilo per punti disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria in modo da evitare eventuali difetti di planarità della rampa.

Rilevando il profilo nella zona del fondo mobile le sezioni longitudinali e trasversali sono basate su di uno schema fisso, ma alcune vengono scelte sul momento in modo da ottimizzare il lavoro di rilievo con le varie configurazioni liquide verificatesi. Di notevole importanza per la ricerca dell'altezza di moto uniforme è risultato anche il rilievo del livello idrico nella zona terminale del modello, a valle del risalto.

Al termine delle misure del profilo liquido, si esegue il rilievo del profilo di scavo in condizioni asciutte ovvero attendendo una volta interrotta l'alimentazione della pompa che il modello si svuotasse. Le sezioni di misura sono state infittite longitudinalmente laddove la configurazione dello scavo variava più rapidamente

Tutte le prove sono state effettuate in condizioni di risalto libero a valle della rampa come evidenziato dal grafico seguente.

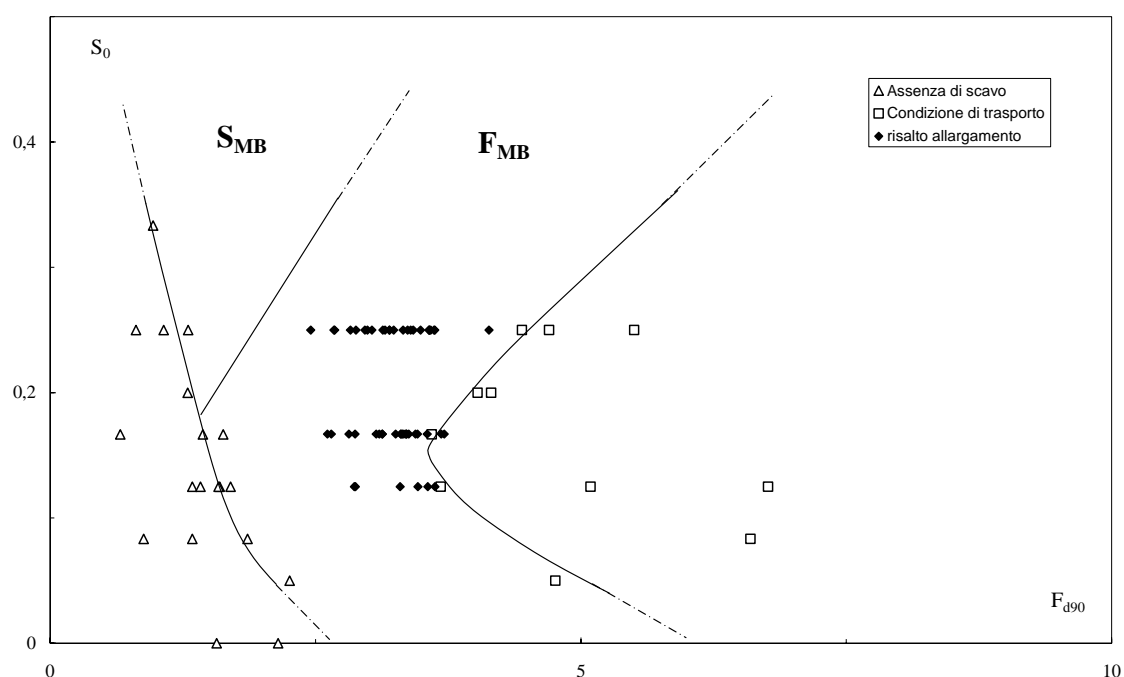


Fig. 2.2.1 Modello 2

Come evidenziato in figura tutte le nostre esperienze sono in condizioni di risalto di tipo F_{MB} con F_{d90} da 2,5 a 3,75.

2.3 Caratterizzazione dei materiali

Quando si pensa ad un letto di un corso d'acqua naturale si pensa di solito ad un'entità unica mentre bisognerebbe considerare che esso è costituito da una miriade di particelle individuali ciascuna delle quali costituisce un'entità separata.

In altri termini le proprietà delle particelle individuali, così come le proprietà riguardanti le dimensioni dei sedimenti, devono essere analizzate.

Le proprietà delle particelle individuali sedimentarie sono state studiate dettagliatamente sia dai geologi che dagli ingegneri idraulici.

I geologi hanno studiato queste proprietà per scoprire le origini del sedimento e per studiare la natura degli agenti di trasporto, gli ingegneri idraulici invece hanno studiato queste proprietà poiché esse hanno importanza rilevante sul fenomeno del trasporto dei sedimenti nei corsi d'acqua.

Tra le proprietà delle particelle individuali, quelle che giocano un ruolo fondamentale nel presente studio sono :

- il peso specifico;
- la dimensione ;
- la forma.

2.3.1 *Peso specifico*

Il peso specifico è definito come il peso dell'unità di volume del materiale costituente le particelle sedimentarie; esso dipende in maniera preponderante dalla composizione mineralogica delle particelle individuali.

La composizione mineralogica delle particelle è un importante elemento, oltre che per il peso specifico anche perché la presenza o assenza di certi minerali dà importanti indizi sulla storia della roccia madre del deposito dovuto all'erosione del bacino imbrifero.

Esiste un'ampia scala di minerali, quelli a minor peso specifico risultano senz'altro i minerali argillosi come caolinite e sercite, maggior peso specifico presentano calcite, dolomite, feldspar e quarzo, mentre decisamente minerali pesanti sono augite, carnet, e magnetite.

Il pietrame impiegato nella presente ricerca è costituito da basalti, e da marmi e calcari di cava successivamente frantumati; in molti casi è stato necessario selezionare il materiale al fine di ricavare più campioni significativi.

Gli elementi di ciascun campione sono stati pesati ed in seguito immersi in un recipiente tarato per calcolarne il volume mediante metodo volumetrico. Il peso specifico è stato ricavato semplicemente come rapporto tra le misure di peso e di volume. I dati relativi ai vari campioni di materiale utilizzati sono riportati nelle pagine successive.

2.3.2 Dimensione

Di tutte le proprietà delle particelle sedimentarie, la dimensione del sedimento è una delle più importanti e comunemente usata. Perciò è necessaria una breve ma dettagliata discussione. Se tutte le particelle fossero delle sfere, allora specificando il diametro avremmo caratterizzato completamente la dimensione delle stesse, ma le particelle sedimentarie che costituiscono i letti dei corsi d'acqua naturali hanno forme molto varie; possono essere arrotondate, piatte oppure appuntite. Questa estrema irregolarità della loro forma rende del tutto inefficace una ordinaria classificazione e dunque, il diametro come indice della dimensione delle particelle perde il suo usuale significato. Per queste ragioni, per caratterizzare le dimensioni delle particelle sedimentarie costituenti i letti dei corsi d'acqua, si sono introdotti dei parametri specifici.

- Diametro nominale della particella, d_n esso è definito come il diametro della sfera avente lo stesso volume della particella. Il diametro nominale fornisce un'idea della dimensione fisica della particella.
- Diametro del setaccio, d , in molti casi una serie di setacci è utilizzata per la separazione dei sedimenti in varie classi di misura, purché le particelle abbiano un diametro superiore ad un certo valore. La forma delle maglie dei setacci è quadrata. La classificazione dei setacci non è puramente basata sulla

dimensione, bensì i setacci classificano le particelle alla loro più piccola sezione trasversale proprio perché una particella di forma allungata ma con una sezione trasversale molto piccola potrebbe passare attraverso il setaccio. Il diametro del setaccio d di una particella è dato dalla misura della maglia del setaccio attraverso il quale la particella riesce giusto a passare, infatti se prendessimo il setaccio con maglie appena più piccole la particella non riuscirebbe più a passare.

- Dimensione triassiale : molti geologi e ingegneri idraulici hanno definito la dimensione di una particella basandosi su delle misurazioni fatte lungo tre assi mutuamente ortogonali della particella stessa. Se a è l'asse maggiore, b asse intermedio e c l'asse minore, allora si può dare il valore dell'asse intermedio b come indice di dimensione; in questo caso può persino essere formulata una correzione tra diametro nominale d_n e asse intermedio b della particella. Le dimensioni relative di a, b e c possono darci un'idea oltre che della dimensione della particella anche della sua forma, infatti come vedremo in seguito tali grandezze possono essere usate come indice di forma. L'obiezione che può essere sollevata a questo metodo di descrizione della dimensione delle particelle è di non essere molto preciso; infatti le differenze nell'interpretazione e le variazioni nelle misure tecniche sono comuni. Per esempio, siccome gli assi sono tra loro mutuamente ortogonali, i valori di a, b e c per una data particella dipendono da quale asse è scelto per primo.

Sono stati condotti alcuni lavori per determinare le relazioni tra i vari parametri di misura della dimensione delle particelle elencati sopra.

E' stato trovato che per materiali naturali c'è una correlazione lineare tra diametro del setaccio, d , e diametro nominale, d_n :

$$d \cong 0.9 \cdot d_n$$

Analogamente, la relazione tra b e d_n può essere espressa nella forma :

$$b = k \cdot d_n$$

Nella quale K è una funzione del fattore di forma $c/(a \cdot b)^{0.5}$.

E' essenziale vedere adesso qual è la terminologia standardizzata riguardante la dimensione delle particelle di modo che essa possa essere utilizzata per esprimere una determinata idea o opinione riguardo la misura delle particelle.

La classificazione accettata dal sottocomitato sulla terminologia dei sedimenti dell'AGU (American Geophysical Union), la quale è largamente usata dagli ingegneri idraulici. Le misure sono date in termini di diametro del setaccio, d , per i comuni materiali; per i materiali più fini è raccomandato il diametro di sedimentazione definito come il diametro della stessa densità relativa e stessa velocità di sedimentazione finale della particella data nello stesso fluido di sedimentazione sotto le stesse condizioni.

2.3.3 Forma

Gli studiosi sono interessati a definire la forma delle particelle sedimentarie per varie ragioni; in particolare gli ingegneri idraulici lo sono perché la forma delle particelle influenza la velocità media della corrente, la quale defluisce sul letto formato da tali particelle; inoltre essa agisce sulla velocità di caduta, sulla stabilità dei litorali e delle spiagge e sul carico di trasporto del letto.

La forma della particella dipende inizialmente dalla roccia madre e dall'azione degli agenti atmosferici; in seguito, comunque, la forma viene modificata da abrasioni, corrosioni e rotture.

Infine la forma della particella, come essa finalmente raggiunge un deposito sedimentario, è governata da certi meccanismi di modellamento come schiacciamenti, frazionamenti, macinazioni ed erosioni chimiche.

Poiché le particelle sedimentarie col tempo si erodono, esse vengono ad assumere una molteplicità di forme, così che le forme geometriche come quella cubica, sferica, cilindrica, conica o ellissoidica diventano inadeguate a descriverle o quanto meno tale descrizione diventa più o meno qualitativa. Quindi per definire la forma è in genere necessario definire un singolo parametro il quale deve essere riconducibile ad un'analisi quantitativa.

Molti di questi parametri sono stati introdotti da numerosi investigatori e sono stati classificati nelle seguenti categorie:

- Coefficienti basati sul volume
- Coefficienti basati sull'area proiettata
- Coefficienti basati sugli assi della classificazione triassiale

Sfericità: si tratta di un parametro basato sul volume delle particelle. Inizialmente la sfericità è stata definita come il rapporto tra l'area della superficie della sfera avente lo stesso volume della particella e l'area della superficie della particella; pertanto, per una particella sferica, la sfericità deve essere uguale all'unità, mentre deve essere minore di tale valore per qualsiasi altra particella non sferica. Tale definizione di sfericità era basata su eccellenti considerazioni teoriche ma risultava difficile da applicare; infatti ottenere la vera area della superficie per particelle molto piccole risulta assai complicato pertanto la sfericità successivamente è stata definita nel modo seguente:

$$Sfericità = \sqrt[3]{\frac{V_{particella}}{V_{sfera}}},$$

dove al numeratore si ha il volume della particella mentre al denominatore per V_{sfera} si intende il volume della sfera circoscritta.

Se d_n è il diametro nominale e a è l'asse maggiore allora la relazione sopra si riduce alla semplice forma seguente:

$$Sfericità = \frac{d_n}{a}$$

Il concetto di sfericità è un importante passo avanti nella descrizione della forma delle particelle. Peraltro non tiene conto della grossezza della particella, data dal rapporto tra gli assi principali b/c ; può così accadere che particelle aventi la stessa sfericità

manifestino una differente grossezza. Per esempio due particelle aventi stesso volume e stesso asse principale maggiore a hanno la stessa sfericità, ma il loro rapporto b/c può essere diverso, infatti tale rapporto per ciascuna particella può variare in teoria da 1 a infinito per cui quella che presenta tale rapporto più vicino all'unità la diremo dotata di una maggiore grossezza rispetto all'altra e questo indipendentemente dal valore della sfericità che è uguale per entrambe.

Coefficiente di rotondità : si tratta di un coefficiente basato sull'area proiettata. Mentre la sfericità è legata alla forma delle particelle confrontate a delle sfere, il termine rotondità è correlato alla sottigliezza e all'acutezza dei vari spigoli e bordi della particella sedimentaria; quindi la rotondità è un indice che fornisce un'idea quantitativa di come gli spigoli e i bordi della particella siano arrotondati o acuti. La rotondità è definita come il rapporto tra il raggio medio di curvatura dei molti spigoli e bordi della particella e il raggio di curvatura della massima sfera inscritta o raggio nominale della sfera.

Comunque, è più conveniente interpretare la rotondità considerando l'area proiettata della particella. Quando la particella è tenuta nella sua posizione più stabile (per esempio, con l'asse minore verticale), il raggio medio di curvatura della superficie proiettata della particella diviso il raggio del massimo cerchio inscritto dà la rotondità della particella.

Rapporto di piatezza (R_p) :

$$R_p = \frac{(a+b)}{2 \cdot c}$$

Evidentemente tale coefficiente deve essere uguale o maggiore dell'unità.

I valori del rapporto di piatezza variano da 1,05 a circa 10 per i sedimenti naturali.

Modulo di piatezza : è definito dal rapporto c/b ; se il modulo di piatezza, c/b è minore di 0,6 la particella è chiamata piatta.

Modulo di lunghezza : è definito dal rapporto a/b ; se il modulo di lunghezza, a/b , è più grande di 1,8 la particella è considerata lunga

2.4 Materiali e Modello asimmetrico

I materiali che abbiamo sottoposto ad analisi sperimentale sono quelli costituenti rispettivamente la rampa ed il fondo mobile. I primi servono a modificare la scabrezza dello scivolo, i secondi sono soggetti al processo di escavazione.

Caratteristiche dimensionali della rampa:

Larghezza cm. 12,5 ;

Lunghezza cm. 80 ;

Pendenze 1:4 ; 1:6 ; 1:8 .

Modello 1 (asse di simmetria posto sul vetro del canale)

Materiale rampa A1 e A2

Materiale bacino dissipazione M1 – M2

Caratteristiche del bacino di dissipazione:

larghezza cm. 15 corrispondente al fattore di allargamento $\lambda=1$;

larghezza cm. 25 corrispondente al fattore di allargamento $\lambda=1,6$;

larghezza cm. 35 corrispondente al fattore di allargamento $\lambda=2,3$;

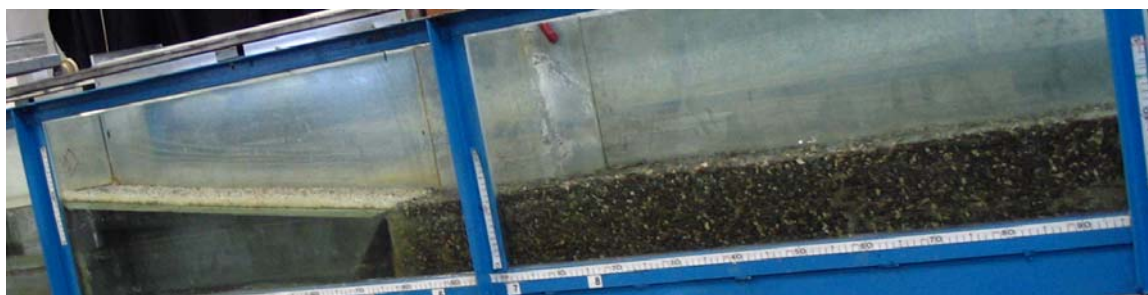


Fig 2.4.1 Foto del modello1 materiale rampa A2 materiale fondo mobile M1



Fig 2.4.2 Foto del modello1 materiale rampa A1 materiale fondo mobile M2

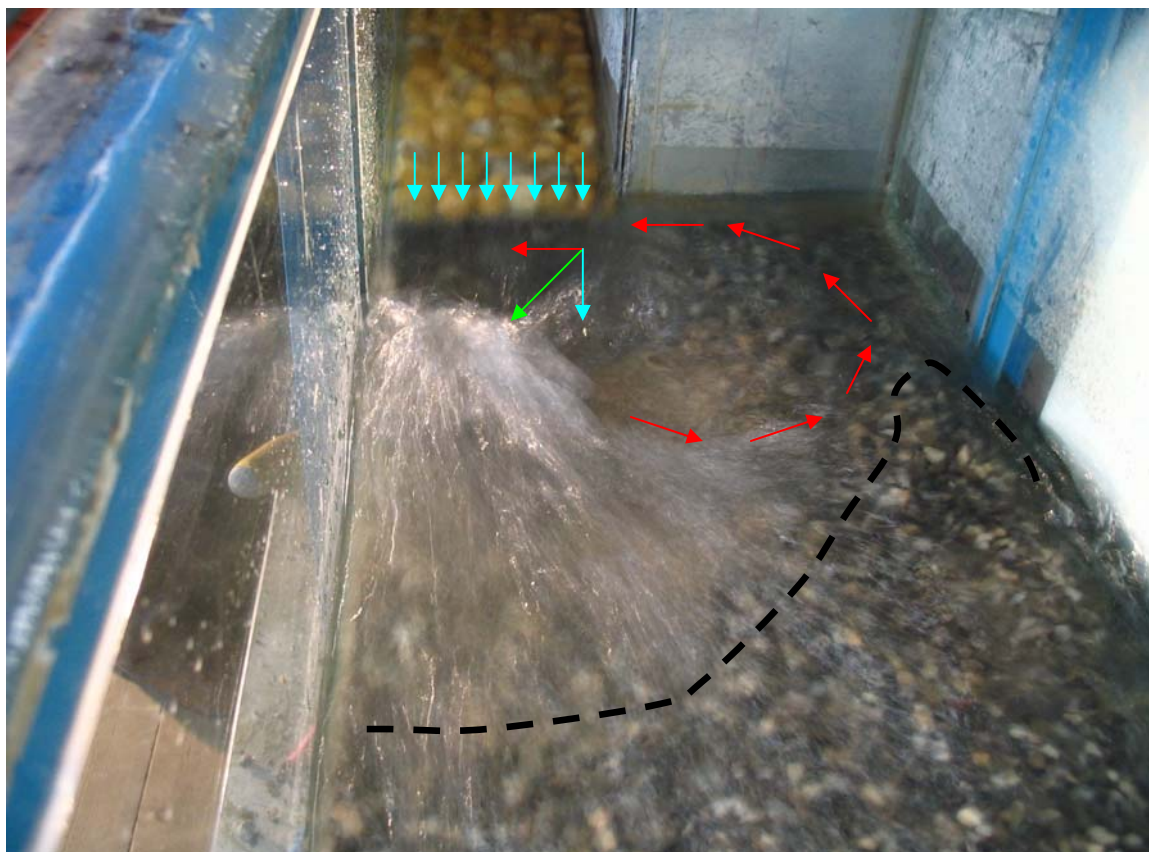


Fig 2.4.3 Foto del modello1

2.5 Materiali e Modello simmetrico

I materiali che abbiamo sottoposto ad analisi sperimentale sono quelli costituenti rispettivamente la rampa ed il fondo mobile. I primi servono a modificare la scabrezza dello scivolo, i secondi sono soggetti al processo di escavazione.

Caratteristiche dimensionali della rampa:

Larghezza cm12,5 ;

Lunghezza cm.80 ;

Pendenze 1:4 ; 1:6 ; 1:8 .

Modello 2 (asse di simmetria posto al centro della rampa)

Materiale rampa A1 e A4

Materiale bacino dissipazione M1

Caratteristiche del bacino di dissipazione:

larghezza cm. 12,5 corrispondente al fattore di allargamento $\lambda=1$;

larghezza cm. 22,5 corrispondente al fattore di allargamento $\lambda=1,8$;

larghezza cm. 35 corrispondente al fattore di allargamento $\lambda=2,5$;



Fig 2.5.1 Foto del modello2

2.6 Materiali costituenti le rampe

Per le rampe sono stati utilizzati materiali di tre diverse scabrezze, denominati A1, A2, A4 le prime due sono state utilizzate nella prima configurazione del modello, mentre quella A4 è stata impiegata nella sperimentazione definitiva. Si riportano qui di seguito le caratteristiche granulometriche principali del materiale A1 e A4:



Fig 2.6.1 Foto materiale rampa A1

σ	1.11
d50	24,01
d65	24,46
d90	26,04



Fig 2.6.2 Foto materiale rampa A4

σ	1.31
d50	14,80
d65	16,06
d90	17,86

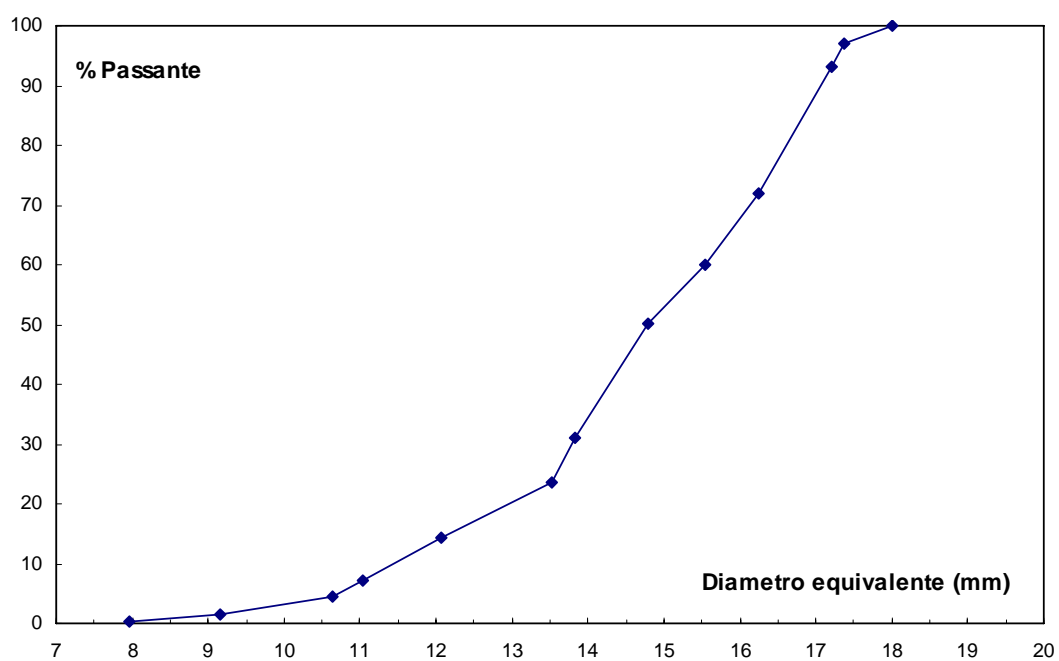


Fig 2.6.3 Curva Granulometrica materiale rampa A4

2.7 Materiali costituenti il fondo mobile

Si sono testati alcuni materiali , ricavati da frantumazione di cava, procedendo alla determinazione prima del peso specifico e successivamente alla costruzione della curva granulometrica attraverso vagliatura su setacci .

Le caratteristiche geometriche del bacino di scavo sono lunghezza costante di cm 120 larghezza cm. 12,5 corrispondente al fattore di allargamento $\lambda=1$;

larghezza cm. 22,5 corrispondente al fattore di allargamento $\lambda=1,8$;

larghezza cm. 35 corrispondente al fattore di allargamento $\lambda=2,8$;

Le caratteristiche granulometriche del fondo mobile individuato come M1 sono:

$$d_{50}=5,75 \text{ mm}$$

$$d_{90}=7,41 \text{ mm}$$

$$\sigma=1,2$$

peso specifico 2645 Kg/m^3

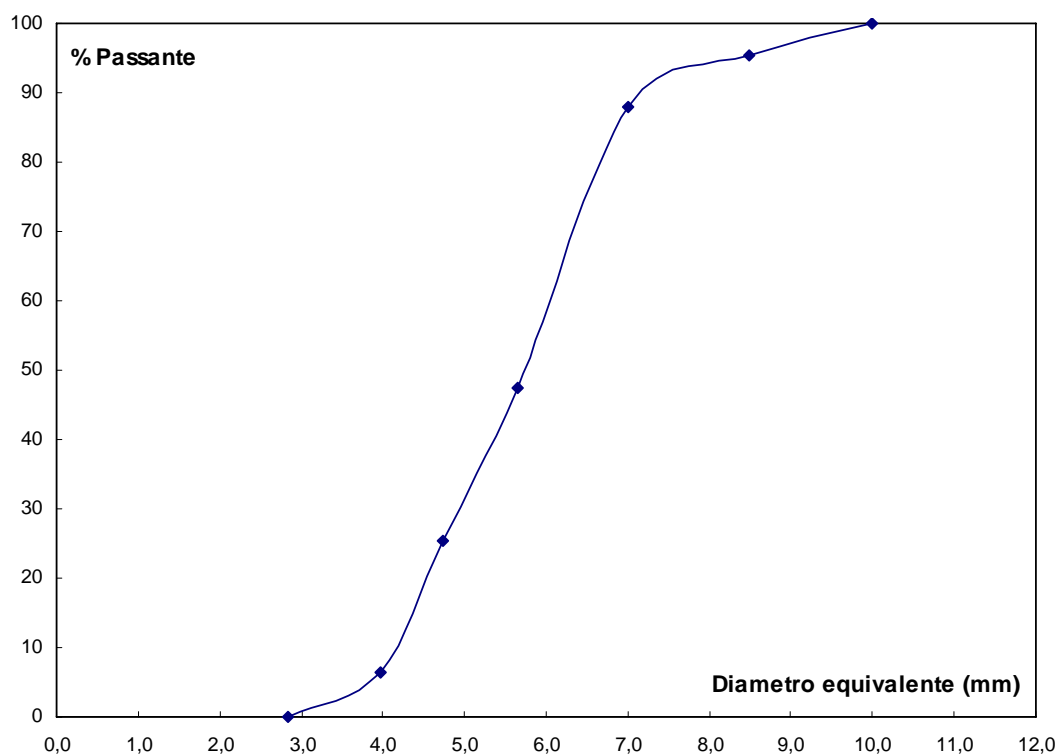


Fig 2.7.1 Curva Granulometrica materiale fondo mobile A4 (modello2)

Il peso specifico del materiale è stato ricavato durante le operazioni di vagliatura ed è stato ottenuto dal rapporto tra il peso del campione e il volume netto; il volume netto del campione è stato ricavato come differenza tra il volume del materiale immerso in acqua e il volume dell'acqua. Il peso specifico del materiale m1 è risultato essere pari a 2654 kg/m^3 .



Fig 2.7.2 Foto del materiale m1.

Si ricavano i parametri del materiale:

σ	1.2
d16	4.35
d50	5.75
d84	6.24
d90	7.41

Nel seguito è indicata l'espressione del parametro σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$$

Nel primo modello è stato anche testato il materiale M2 avente le seguenti caratteristiche granulometriche:

d50=6,56 mm

d90=8,49 mm

peso specifico 2782 kg/m³

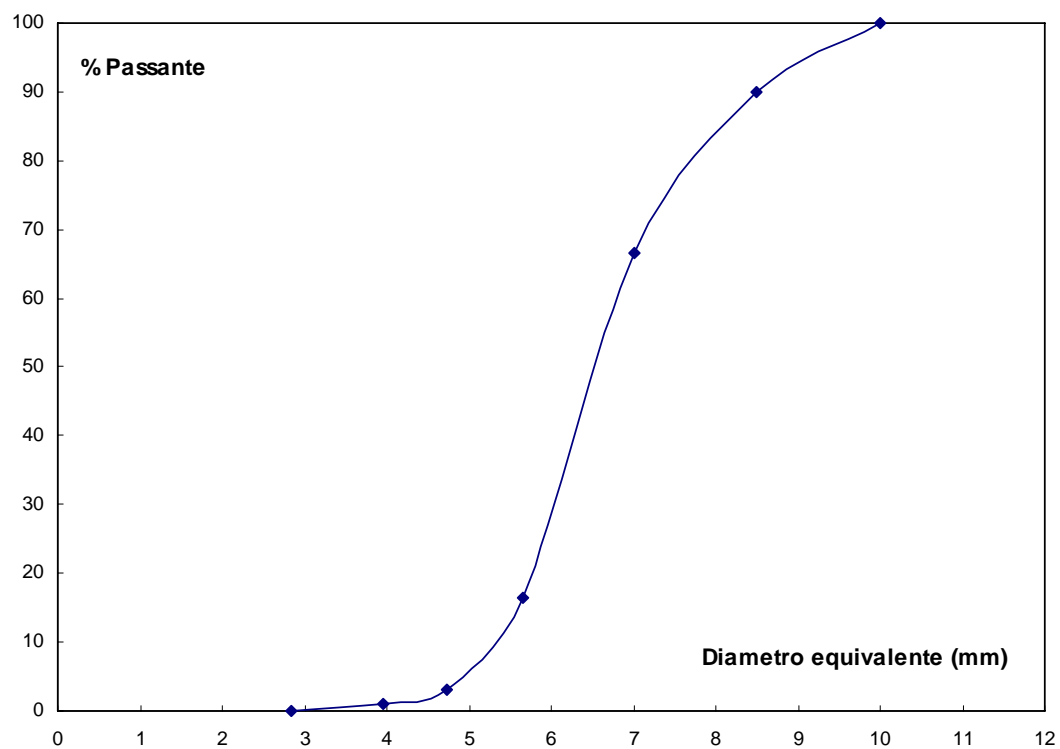


Fig 2.7.4 Curva Granulometrica materiale fondo mobile M2 (modello1)



Fig 2.7.5 Curva Granulometrica materiale fondo mobile M2 (modello1)

3. Definizione delle variabili

Risulta ,ai fini del presente studio , fondamentale definire alcuni concetti per poter meglio nel seguito comprendere l'evoluzione dei fenomeni che saranno esaminati successivamente.

Per migliorare la comprensione del fenomeno si è fin da subito stabilito l'importanza particolare di alcune variabili la cui definizione è riportata in Legenda,ma che sono qui di seguito rappresentate in uno sketch esemplificativo.

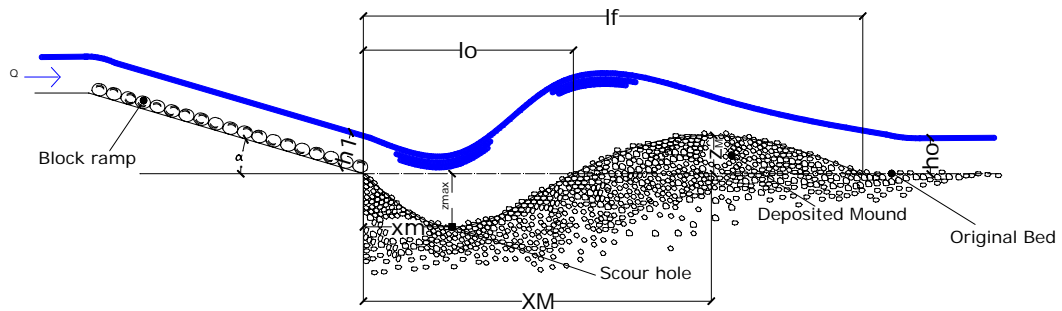


Fig 3.1 Schema longitudinale dei simboli utilizzati.

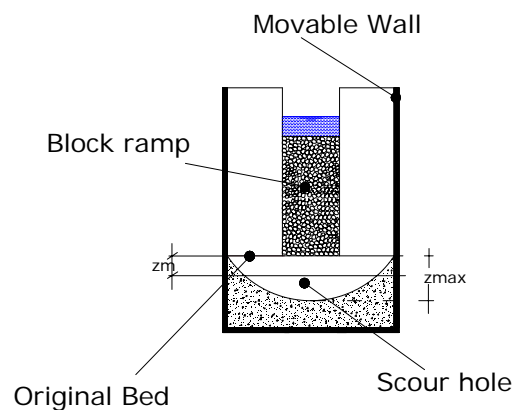


Fig 3.2 Sezione massimo scavo

La simbologia adottata è distinta con i seguenti significati:

z_m = profondità media di scavo nella sezione di massimo scavo

z_{max} = profondità massima nella sezione di massimo scavo

l_o = lunghezza scavo media misurata dal piede della rampa

h_1 = tirante idrico misurato ortogonalmente alla rampa

h_0 = tirante idrico misurato a valle in condizioni di moto uniforme

l_f = lunghezza media piede duna a valle misurato dal piede della rampa

b = larghezza della rampa

B = larghezza della sezione a valle della rampa

z_M = altezza massima della duna

z_{MM} = altezza media della duna nella sezione trasversale di altezza massima

Si riporta la simbologia impiegata nell'indagine granulometrica del fondo mobile a fine prova.

Analisi granulometrica:

d_{16} = diametro corrispondente al 16% del passante in peso

d_{50} = diametro corrispondente al 50% del passante in peso

d_{84} = diametro corrispondente al 84% del passante in peso

d_{90} = diametro corrispondente al 90% del passante in peso

Grandezze adimensionali:

Nelle elaborazioni sono usate alcune grandezze adimensionali, come di seguito specificato :

$$Z_m = z_m / h_1$$

$$Z_{max} = z_{max} / h_1$$

$$Z_M = z_M / h_1$$

$$L_o = l_o / h_1$$

$$T_w = h_o / h_1$$

$$\lambda = B / b.$$

Uno tra i più importanti parametri che considereremo è il numero di Froude, pari al rapporto fra la velocità media della corrente e quella delle piccole oscillazioni. Tale parametro adimensionale ci consente di suddividere una corrente in subcritica ($Fr < 1$) e supercritica ($Fr > 1$). L'espressione del numero di Froude è la seguente:

$$F = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad \text{con } g \text{ accelerazione di gravità e } h \text{ e } v \text{ rispettivamente tirante idrico e velocità della corrente.}$$

Faremo uso del Froude principalmente per la classificazione del tipo di risalto che si genera al piede della rampa.

Un più importante parametro, ancora adimensionale, strettamente connesso al Froude è il numero di Froude densimetrico o sedimentologico (F_d), che ci consente di raffrontare le caratteristiche del fondo mobile con quelle della corrente.

E' definito come :

$$F_{d_i} = \frac{v}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g\right) \cdot d_i}}$$

Ed in pratica risulta pari al rapporto fra la spinta idrodinamica S esercitata su una generica particella da una corrente di velocità v e il peso sommerso P' della particella stessa.

$$F_{d_{90}} = \frac{v}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g\right) \cdot d_{90}}}$$

$$F_{d_{50}} = \frac{v}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g\right) \cdot d_{50}}}$$

Elevando al quadrato e moltiplicando numeratore e denominatore per d_i^2 si ottiene infatti:

$$F_d^2 = \frac{S}{P \cdot C_d}$$

Dove C_d è il coefficiente di resistenza idrodinamica della particella.

Le configurazioni di allargamento a valle della rampa sono individuate dal coefficiente λ che rappresenta il rapporto tra la larghezza del canale a valle della rampa (B) e la larghezza della rampa stessa (b).

Le prove si sono eseguite su una rampa di larghezza variabile dal modello asimmetrico a quello simmetrico; nel primo caso ovvero modello asimmetrico abbiamo iniziato le indagini con una larghezza della rampa pari a cm 15, ed un bacino di dissipazione variabile da cm 15 a 35 riuscendo così a studiare il fenomeno per un fattore di allargamento massimo $\lambda=2,33$.

Nella configurazione definitiva dove abbiamo posto la rampa al centro del canale studiando il fenomeno nella sua interezza e quindi con allargamenti simmetrici, si è corretta la larghezza della rampa in pietrame riducendola a 12,5 cm. In questo caso con una larghezza $b=12,5$ ed un bacino di dissipazione variabile da 12,5 a 35 cm siamo riusciti ad indagare fenomeni per fattori di allargamento variabili da $\lambda=1$ fino a $\lambda=2,8$. tutto quanto sopra descritto si è rappresentato schematicamente attraverso le due figure seguenti. (fig.3.2-fig.3.3).

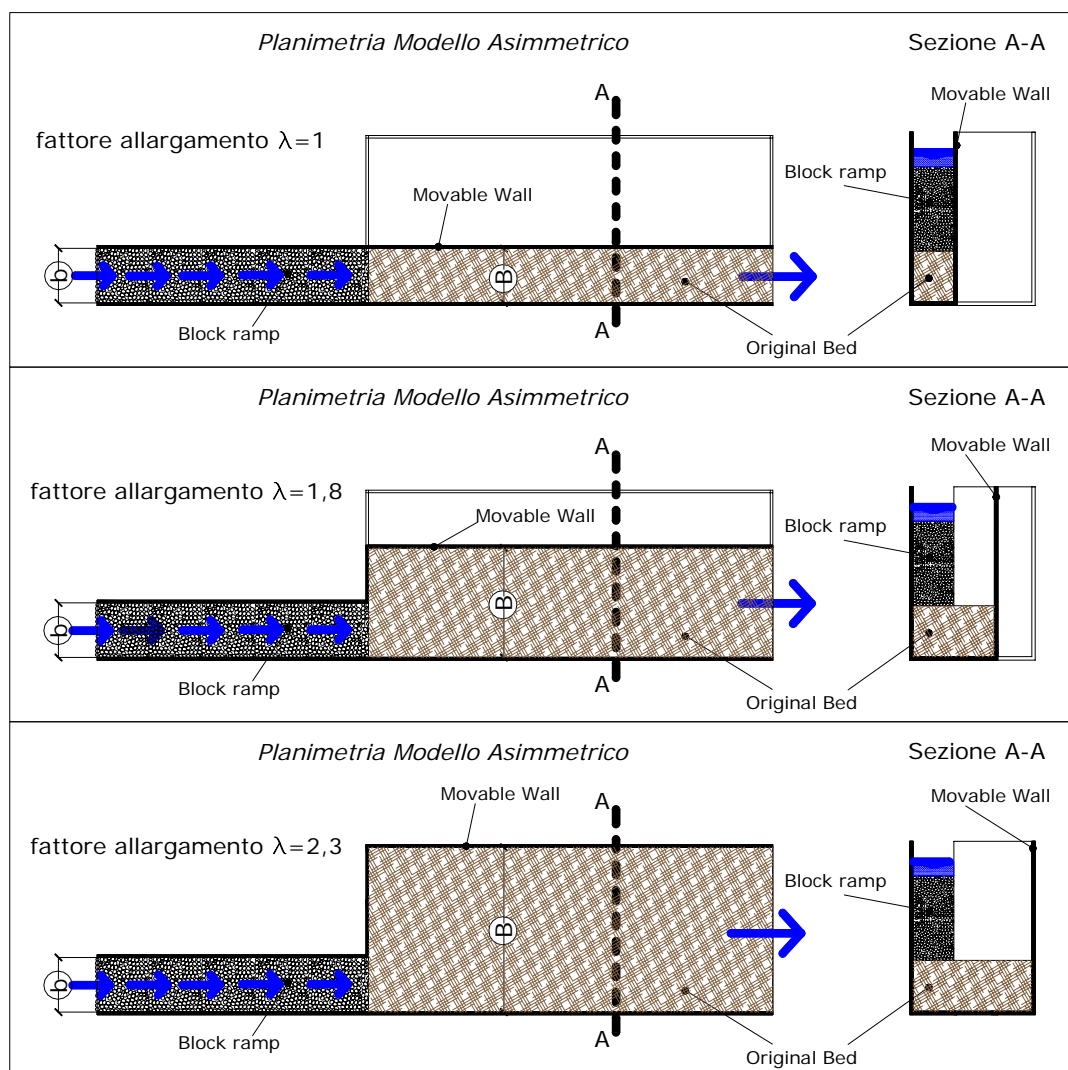


Fig 3.2 Schema planimetrico del modello Asimmetrico ($b=15cm$)

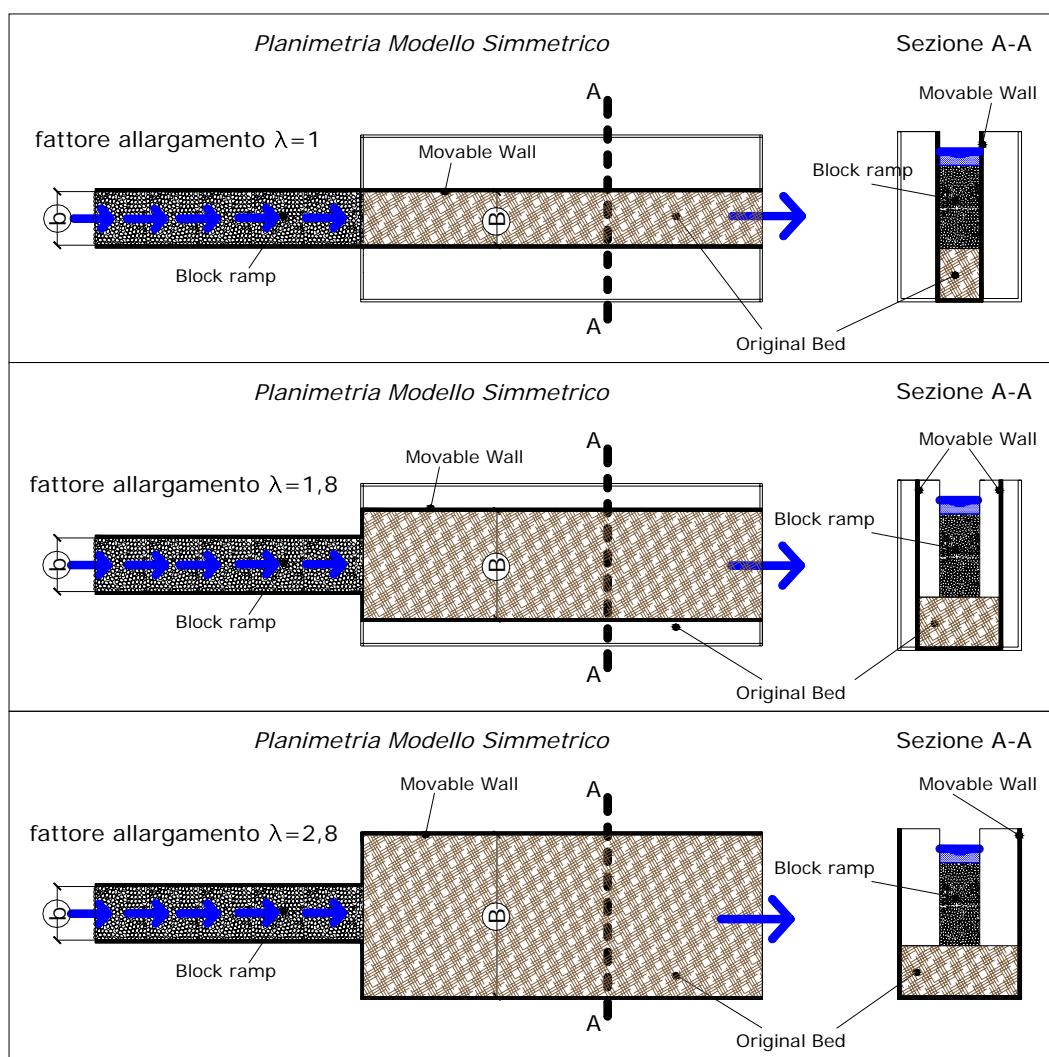


Fig 3.3 Schema planimetrico del modello Simmetrico ($b=12,5cm$)

3.1 Parametri idrodinamici influenti

Il fenomeno idraulico oggetto del presente studio è influenzato da diverse variabili che devono essere opportunamente individuate al fine di descrivere in modo completo il processo di scavo a valle di rampe in pietrame.

Il fenomeno è studiato in un modello a scala ridotta utilizzato per potere predire il comportamento del sistema reale in relazione ad alcune caratteristiche.

Il concetto alla base della realizzazione di modelli atti a predire fenomeni reali è la similitudine che può essere limitata solo a determinate grandezze meccaniche (similitudine geometrica, cinematica, dinamica) o, preferibilmente, può estendersi a tutte le grandezze a seconda della complessità che ne deriva.

Il fenomeno qui analizzato, come ogni altro fenomeno reale, è caratterizzato da una serie di parametri (variabili indipendenti o di controllo) attraverso i quali è possibile esprimere ogni altra grandezza di interesse.

Il teorema di **Buckingham-Riabucinski o teorema del Π** costituisce il fondamento teorico dell'analisi dimensionale. Esso permette di scegliere parametri tra loro indipendenti, atti a rappresentare una base di un sistema di unità di misura, ed esprimere ogni altra variabile come prodotto di potenze delle grandezze base del sistema di unità scelto.

Se un fenomeno è funzione di n variabili e se le n variabili possono essere descritte da m grandezze fondamentali, allora è possibile raggruppare le n variabili in $n-k$ termini adimensionali che descrivono il fenomeno stesso; k può essere minore o uguale a m ma in genere $k=m$.

Nella maggior parte dei casi in idraulica si pone $m=3$.

Il fenomeno qui studiato può essere rappresentato dalla seguente legge funzionale:

$$F=f(z, h_1, q, i, h_0, d_{90}, g, \rho, \Delta\rho, \lambda, \sigma) \quad (1)$$

dove:

q : portata liquida

h_1 : tirante liquido sulla rampa

h_0 : tirante liquido a valle in moto uniforme

i : pendenza della rampa

d_{90} : diametro corrispondente al 90 % di passante della curva granulometrica

g : accelerazione gravitazionale

ρ : densità dell'acqua

$\rho_s - \rho$: differenza tra la densità del materiale alleggerito

$\lambda = B/b$ fattore di allargamento a valle della rampa

σ : coefficiente di non uniformità dei sedimenti

L'applicazione del Teorema del Π , o teorema di Buckingham, consente di esprimere la relazione (1) facendo ricorso a dei raggruppamenti adimensionali $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$ oltre alla pendenza i e al fattore di allargamento λ .

$$\varphi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, i, \lambda) = 0 \quad (2)$$

essendo φ un simbolo funzionale.

In particolare, scegliendo come fondamentale la terna di grandezze dimensionalmente indipendenti q, ρ, d_{90} , atte a rappresentare una terna di grandezze base per un sistema di unità di misura, il raggruppamento Π_1 è individuato dalla seguente relazione:

$$\Pi_1 = q^\alpha \rho^\beta d_{90}^\gamma z^1$$

Essendo Π_1 un gruppo adimensionale, i valori numerici delle costanti α, β, γ si deducono risolvendo il sistema di 3 equazioni in tre incognite che deriva dalla precedente equazione nella quale si sostituiscono le unità di misura

$$\Pi_1 = m^{2\alpha} \cdot s^{-\alpha} \cdot kg^{\beta} \cdot s^{2\beta} \cdot m^{-4\beta} \cdot m^{\gamma} \cdot m$$

Da cui risolvendo il sistema si ha:

$$0 = 3\alpha - 3\beta + \gamma + 1$$

$$0 = -\alpha$$

$$0 = \beta$$

La terna di soluzione è:

$$\alpha = 0$$

$$\beta = 0$$

$$\gamma = -1$$

Il raggruppamento Π_1 quindi è dato da:

$$\Pi_1 = \frac{z_{\max} + h_0}{d_{90}}$$

Ripetendo la procedura si ottengono analogamente gli altri gruppi:

$$\Pi_2 = \frac{h_1}{d_{90}}$$

$$\Pi_3 = \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

$$\Pi_4 = \frac{g \cdot d_{90}^3}{q^2}$$

Altri raggruppamenti dimensionali possono essere ricavati mediante opportuna combinazione di quelli già determinati e possono essere utilizzati in sostituzione proprio dei $\Pi_i (i=1, \dots, 4)$.

Combinando Π_1 con Π_2 si ottiene:

$$\Psi_1 = \frac{\Pi_1}{\Pi_2} = \frac{z_{\max} + h_0}{d_{90}} \cdot \frac{d_{90}}{h_1}$$

La relazione funzionale (2) diviene pertanto:

$$\varphi(\Psi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, i, \lambda) = 0$$

Analogamente si può ricavare:

$$\Psi_2 = \frac{1}{\Pi_2} \cdot \left(\frac{1}{\Pi_3 \cdot \Pi_4} \right)^{1/2} = \frac{v_1}{g^{1/2} \cdot d_{90} \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^{1/2}}$$

In definitiva la relazione funzionale (2) diviene :

$$\varphi(\Psi_1, \Psi_2, \Pi_3, \Pi_4, i, \lambda) = 0$$

Il parametro dimensionale Π_3 è pressoché costante per i materiali generalmente utilizzati per cui può essere trascurato.

Pertanto alla fine la relazione funzionale (2) diviene:

$$\varphi(\Psi_1, \Psi_2, i, \lambda) = 0$$

Sostituendo i raggruppamenti adimensionali si ottiene:

$$\Phi \left(\frac{z_{\max} + h_0}{h_1}, \frac{v_1}{g^{1/2} \cdot d_{90} \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^{1/2}}, i, \lambda \right) = 0$$

Così $(z_{\max} + h_0)/h_1$ può essere espresso utilizzando la seguente relazione funzionale esplicita:

$$\Phi \left(F_{d_{90}} = \frac{v_1}{g^{1/2} \cdot d_{90} \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^{1/2}}, i, \lambda \right) = \frac{z_{\max} + h_0}{h_1}$$

Spesso viene utilizzato il numero di froude Fd_{50} , nella cui espressione, analoga alla precedente, compare il d_{50} anziché il d_{90} :

$$F_{d_{50}} = \frac{v}{\sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g \cdot d_{50}}}$$

Il numero di Froude densimetrico consente di raffrontare le caratteristiche del fondo mobile con quelle della corrente; esso risulta pari al rapporto tra la spinta idrodinamica S esercitata da una corrente di velocità v su una generica particella e il peso sommerso P della particella stessa:

$$F_{d_i} = \frac{v}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g\right) \cdot d_i}}$$

4. Descrizione del fenomeno di scavo

4.1 Premessa

Nel corso degli anni una gran quantità di studiosi si sono spinti nell'analisi dei processi di scavo da parte di una vena liquida che impatta ad elevata velocità su fondo erodibile in quanto una delle principali motivazioni è legata alla stabilità strutturale dei manufatti che vengono realizzati all'interno degli alvei.

Il processo di scavo prodotto da un getto liquido è un fenomeno estremamente complesso, in quanto dipende da molti parametri, alcuni dei quali difficilmente valutabili, come ad esempio il grado di turbolenza della corrente che si verifica nella fossa di erosione.

Uno dei più importanti fattori da tenere in considerazione è l'energia del getto.

La geometria della fossa di scavo è notevolmente influenzata anche dall'angolo di inclinazione con cui il getto impatta sul fondo e dalla distanza del punto di impatto dalla zona in cui si origina.

Inoltre un altro fattore determinante del processo è la profondità del cuscino d'acqua in cui il getto si diffonde dopo l'impatto sul fondo.

Infine, la configurazione dello scavo dipende dalle caratteristiche dei sedimenti costituenti il fondo alveo, tra cui la densità; da questa dipende la velocità con cui il materiale asportato dal getto si deposita sul fondo.

Basandosi su modelli in piccola scala, Zanke (1978) ha individuato quattro fasi nell'evoluzione del processo di scavo: una fase iniziale, una fase in cui si ha lo sviluppo della profondità di scavo, una fase di stabilizzazione, ed una fase di equilibrio finale.

Durante la fase iniziale, la corrente è approssimativamente uniforme nella direzione longitudinale. Questa fase del processo di scavo può essere caratterizzata come lo stadio in cui il getto presenta la maggiore capacità erosiva: nel punto di impatto con il fondo, il getto, animato da una elevata velocità, dissipa la propria energia cinetica mediante la

formazione di vortici che danno luogo allo scalzamento di fondo. Infatti, la forte velocità della vena liquida causa localmente notevoli azioni tangenziali che generalmente superano il valore critico di moto incipiente del materiale. Il materiale scavato viene poi trasportato verso valle, mediante un meccanismo sia di sollevamento che di trascinamento sul fondo.

Durante la fase di sviluppo, la profondità di scavo si incrementa notevolmente, ma la forma della fossa rimane pressoché costante: oltre ad un aumento della profondità si verifica anche un allontanamento del punto di massimo scavo dal punto in cui il getto impatta sul fondo; tutto questo avviene mantenendo pressoché costante il rapporto tra profondità e distanza del punto di massimo. D'altra parte in seguito all'approfondimento dello scavo, aumenta anche la profondità del cuscino d'acqua che si viene a formare al suo interno, con conseguente riduzione delle azioni tangenziali agenti sul fondo.

Si può ritenere che la profondità massima di scavo venga raggiunta nella fase di stabilizzazione, quando tali azioni tangenziali sono diminuite fino al valore critico caratteristico del materiale di fondo; in questa condizione la corrente non è più in grado di rimuovere altri sedimenti alla zona di scavo.

A questo punto, si può ritenere che la geometria di scavo abbia raggiunto una condizione asintotica o di equilibrio, per cui la fossa di scavo non subisce ulteriori approfondimenti significativi.

L'inserimento di strutture trasversali di tipo qualsiasi, anche di modeste entità, o la modifica delle dimensioni di un tratto dell'alveo deve essere infatti preceduto da una rigorosa analisi sull'evoluzione morfologica dello stesso, per non rischiare di compromettere la stabilità dell'intervento. In molti casi il costruttore, in mancanza di informazioni relative all'ipotetico scavo di fondo, può sovradimensionare le opere di salvaguardia andando incontro ad evidenti aumenti di costi economici e probabilmente ad un maggiore impatto ambientale.

Tutto questo sintetizza la necessità di una sperimentazione in laboratorio su modelli in scala ridotta, al fine di ricavare formule empiriche da poter applicare ai prototipi per valutare le escavazioni attese.

4.2 Evoluzione del processo di scavo (modello asimmetrico)

La tesi sull'evoluzione del processo di scavo in funzione dell'allargamento dell'alveo a valle della rampa è stata impostata inizialmente con un modello che rappresentava la metà simmetrica della rampa e del corso d'acqua come visibile in figura 4.2.1.



figura 4.2.1 vista rampa e bacino di dissipazione modello 1

Questa impostazione teoricamente molto interessante in quanto permetteva investigazioni su allargamenti a valle considerevoli ha dato inizialmente dei piccoli problemi sulle prove di taratura non riuscendo a verificare formule già provate in esperienze precedenti.(figura .4.2.2)

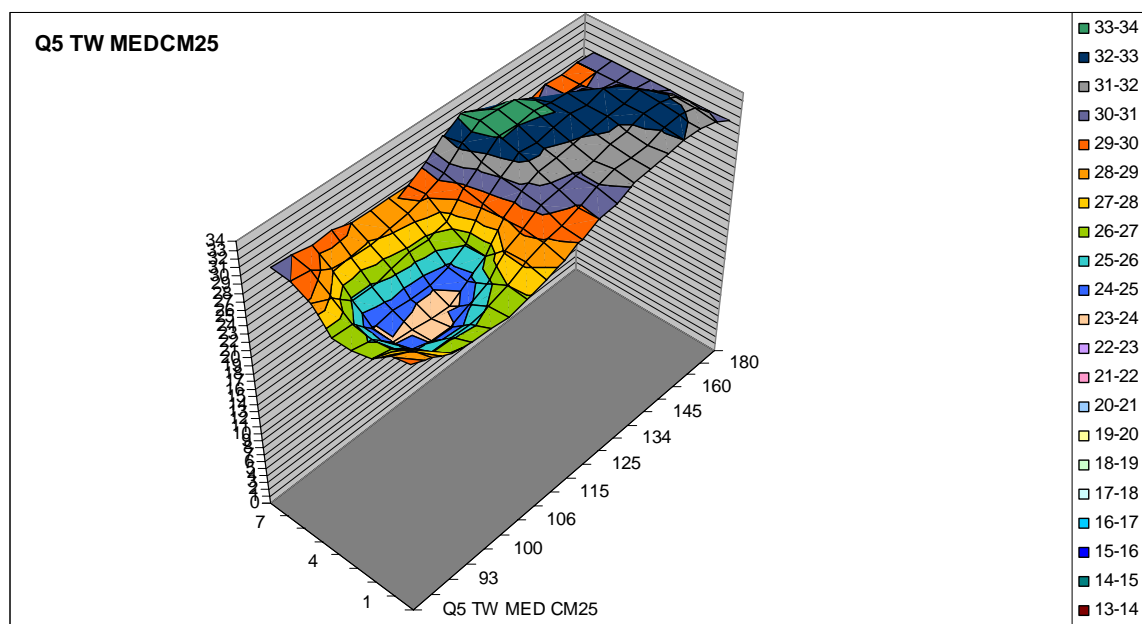


figura 4.2.2 visualizzazione in 3dimensioni andamento quote scavo nel modello 1



figura 4.2.3 visualizzazione con filo angolo di deviazione filetti

Lo scavo a fine prova si presentava sempre a pianta ellittica, ma con l'asse maggiore di simmetria deviato verso la sponda che presentava l'allargamento dell'alveo. Questa deviazione faceva sì che nei pressi del vetro, rappresentante per noi l'asse di simmetria dell'alveo, vi fosse un'area, all'altezza del punto di massimo scavo, in cui il trasporto del materiale risultasse pressoché nullo.

Problemi che si evidenziavano sempre più nelle varie configurazioni di pendenza della rampa ed allargamento a valle. La scrupolosa analisi dello scavo ci fece iniziare a porre maggiore attenzione al moto ed alla direzione dei filetti fluidi ai quali imputammo inizialmente la responsabilità di questo fenomeno.

Si notò nelle misure degli scavi che l'asse di simmetria teorico del canale di valle, asse rappresentato dal vetro del nostro canale di laboratorio, non aveva andamento perfettamente rettilineo e parallelo al vetro, ma presentava un significativo angolo di deviazione verso la parte dell'allargamento.

Inizialmente la deviazione che subiva sembrava essere causata dal solo effetto di aderenza dovuto alla presenza del vetro ma con l'aumentare del numero delle prove si arrivò alla conclusione che l'effetto risultante era somma di almeno due cause.

La prima dovuta ad un eccessivo rallentamento della velocità della corrente provocato dall'aderenza del fluido al vetro di contenimento del canale rappresentato in foto dalle frecce rosse continue parallele al vetro, mentre la seconda, di gran lunga più importante, era dovuta alla riflessione da parte del vetro del canale, dei filetti fluidi.

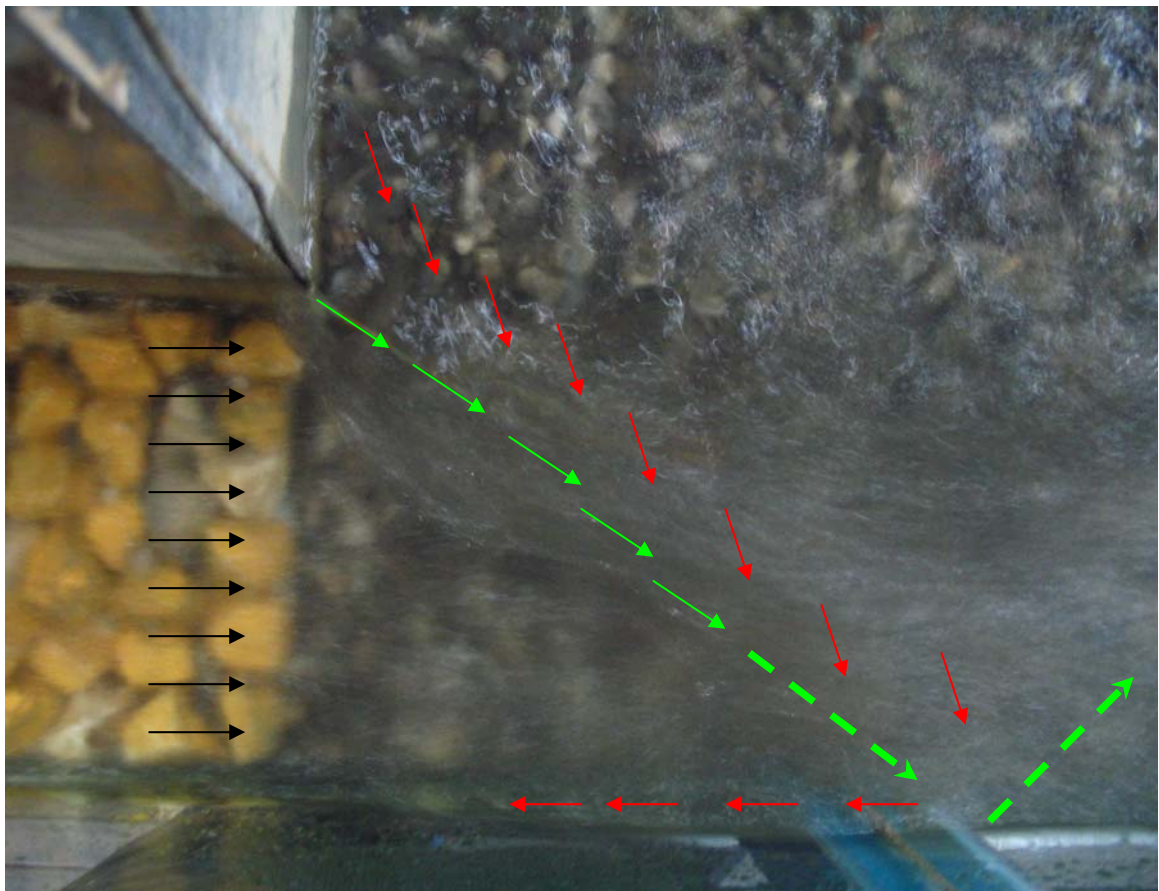


figura 4.2.3 rappresentazione grafica andamento filetti modello1

Tali filetti rappresentati in figura 2.2.2. da frecce nere continue risultano indisturbati sulla rampa, ma appena immessi nel bacino di dissipazione vengono deviati in modo significativo dai filetti provenienti dalla parte dell'allargamento. Questo effetto che ci aspettavamo risultò però più intenso del previsto causando così una azione di disturbo nei confronti dello scavo che risentiva della riflessione dei filetti (freccia verde tratteggiata) sulla parete di vetro.

Questo fenomeno, inizialmente di disturbo, ha invece posto l'attenzione sul vero problema degli scavi in bacini a larghezza variabile, ovvero su come valutare questo effetto legato all'influenza dell'angolo in uscita dalla rampa del filetto fluido che deviato verso il centro del canale aumenta la sua intensità provocando un sensibile aumento degli scavi a valle della rampa.

Constatare che gli scavi aumentano in funzione dell'allargamento rende lo studio della tesi ancor più interessante, ma purtroppo, il modello sopradescritto non riesce a dare dei valori coerenti con gli studi precedenti eseguiti da altri autori.

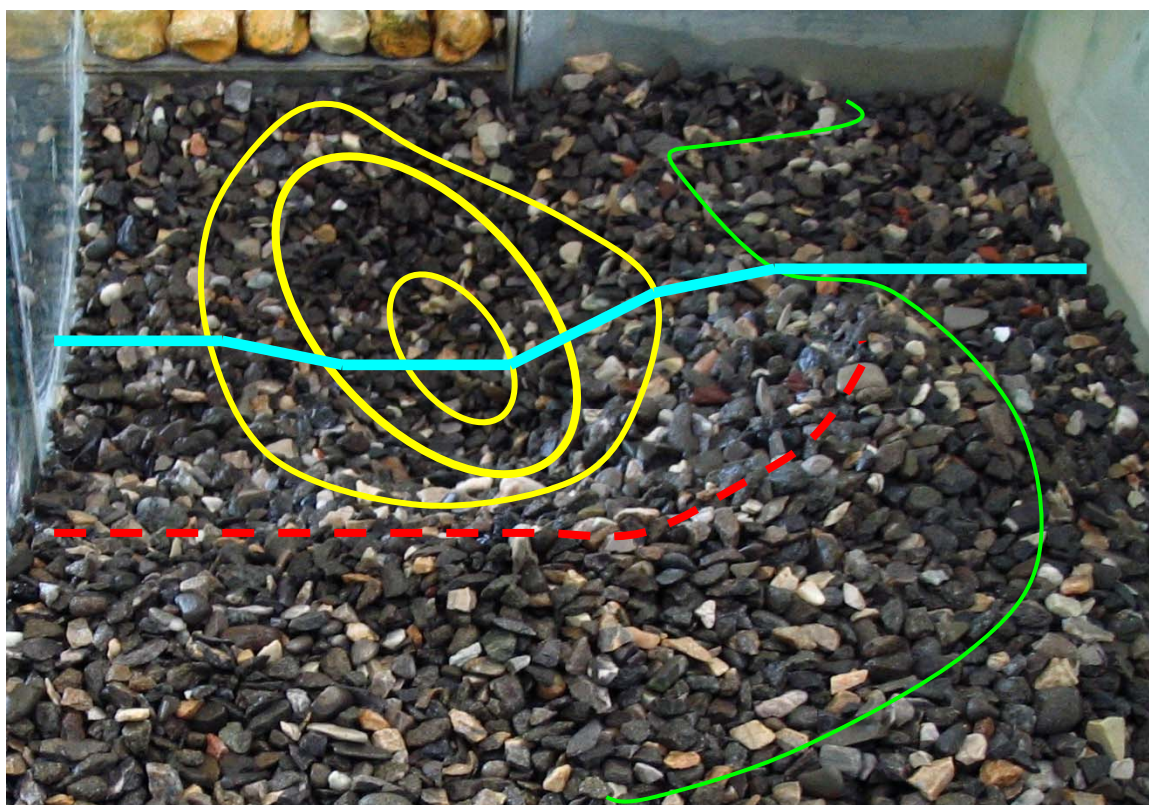


figura 4.2.4 rappresentazione grafica andamento filetti modello1

In giallo sono indicate le curve di livello dello scavo, l'ellisse piccolo centrale rappresenta l'area di maggiore scavo, mentre in tratto discontinuo rosso si è rappresentata la linea di vertice della duna ed in tratto continuo verde si delimita la zona inalterata, ovvero che non ha subito alterazioni dal punto di vista altimetrico. E' evidente che l'asse maggiore della zona gialla di massimo scavo ha subito una notevole deviazione in quanto

non risulta parallelo al vetro del canale, inoltre si è evidenziato in ciano l'andamento della sezione di massimo scavo. Anche la sezione di massimo scavo risulta vistosamente spostata verso l'allargamento del canale.

4.3 Evoluzione del processo di scavo (modello simmetrico)



figura 4.3.1 vista rampa e bacino di dissipazione modello simmetrico

Il problema incontrato con il primo modello è stato superato con il secondo modello dove si è riusciti ad eliminare l'effetto sopra descritto a valle della rampa.

La risoluzione del problema si è ottenuta impostando la rampa al centro del canale per andare a disporre gli allargamenti, simmetrici rispetto all'asse centrale del canale,

rappresentato in figura su entrambi i lati a valle della rampa. In questo modo l'asse centrale di simmetria è risultato essere libero e non influenzato da alcuna perturbazione.

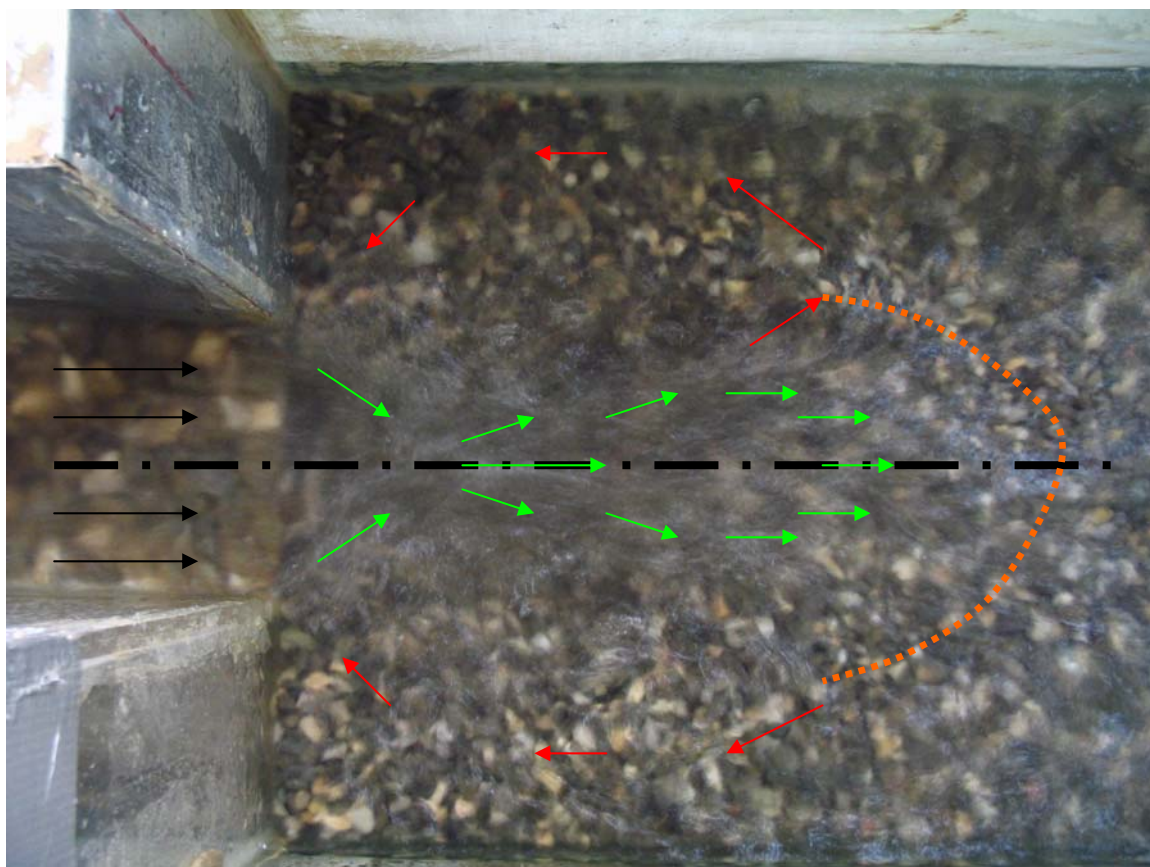


figura 4.3.2 rappresentazione grafica andamento filetti modello simmetrico

Nella rappresentazione di figura 4.3.2 si è evidenziato in tratto punteggiato colore arancio la posizione della duna. Il formarsi della duna genera una deviazione dei filetti rappresentati in colore verde. I filetti deviati di colore rosso si muovono in senso opposto alla corrente generando una volta raggiunta la rampa la deviazione dei filetti indisturbati di colore nero in uscita dalla rampa in pietrame.

Abbiamo iniziato le osservazioni del fenomeno in modo visivo introducendo un filo in corda colorato per poter osservare l'andamento dei filetti fluidi ai vari livelli di profondità.

In superficie si hanno tre correnti principali due simmetriche rispetto all'asse di simmetria ed una sull'asse stesso.

La linea immaginaria dei filetti sull'asse di simmetria non varia di molto la sua intensità nell'attraversamento della zona di scavo prima e duna poi.

Le linee di flusso simmetriche rispetto all'asse centrale del canale formano dei tracciati ellissoidali con senso di rotazione orario a destra ed antiorario a sinistra.

I percorsi delle correnti laterali sono quindi in senso opposto rispetto al verso della corrente del corso d'acqua. Il filetto liquido in prossimità delle pareti laterali del canale ha un andamento opposto rispetto a quello della corrente principale e si trova in posizione ortogonale rispetto ai filetti fluidi in uscita dalla rampa. Questo effetto causa una maggiore concentrazione dei filetti della vena fluida sull'asse principale aumentandone la loro intensità.



Fig.4.3.3 In bianco si notano le orbite principali di corrente in rosso l'area interessata dallo scavo

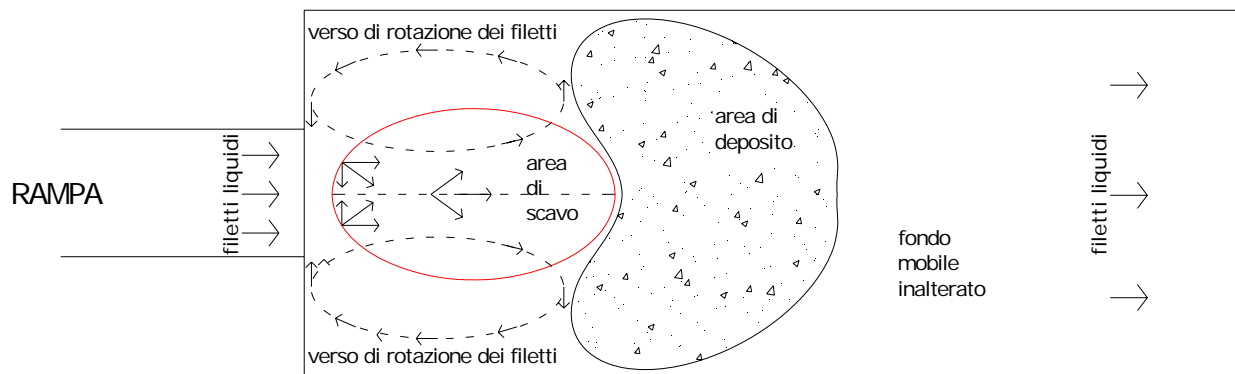


Fig.4.3.4 grafico orbite filetti, area scavo e area deposito con $\lambda=2,5$

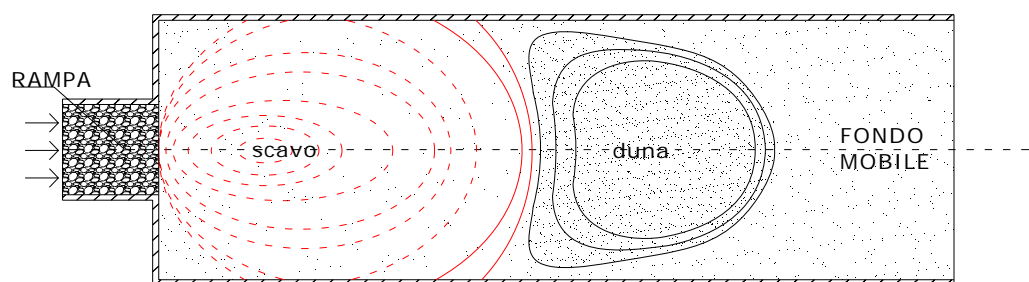
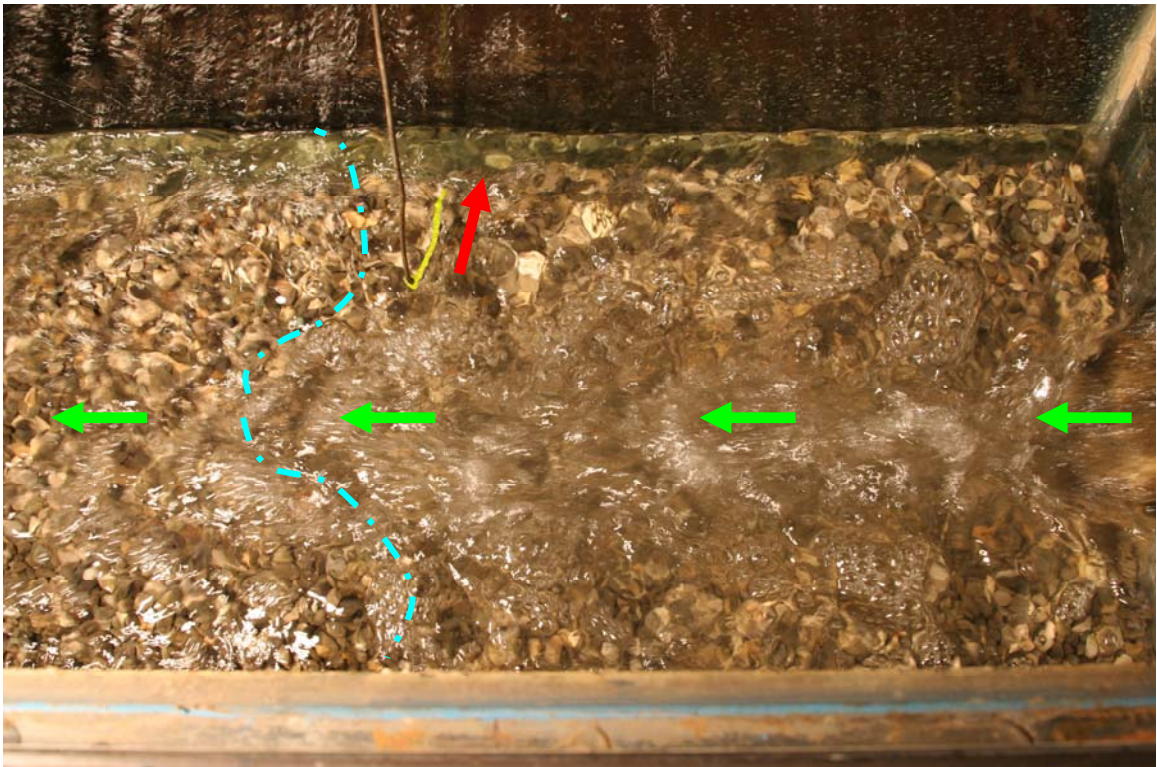


Fig.4.3.5 andamento in rosso scavo - andamento in nero duna con $\lambda=2,5$

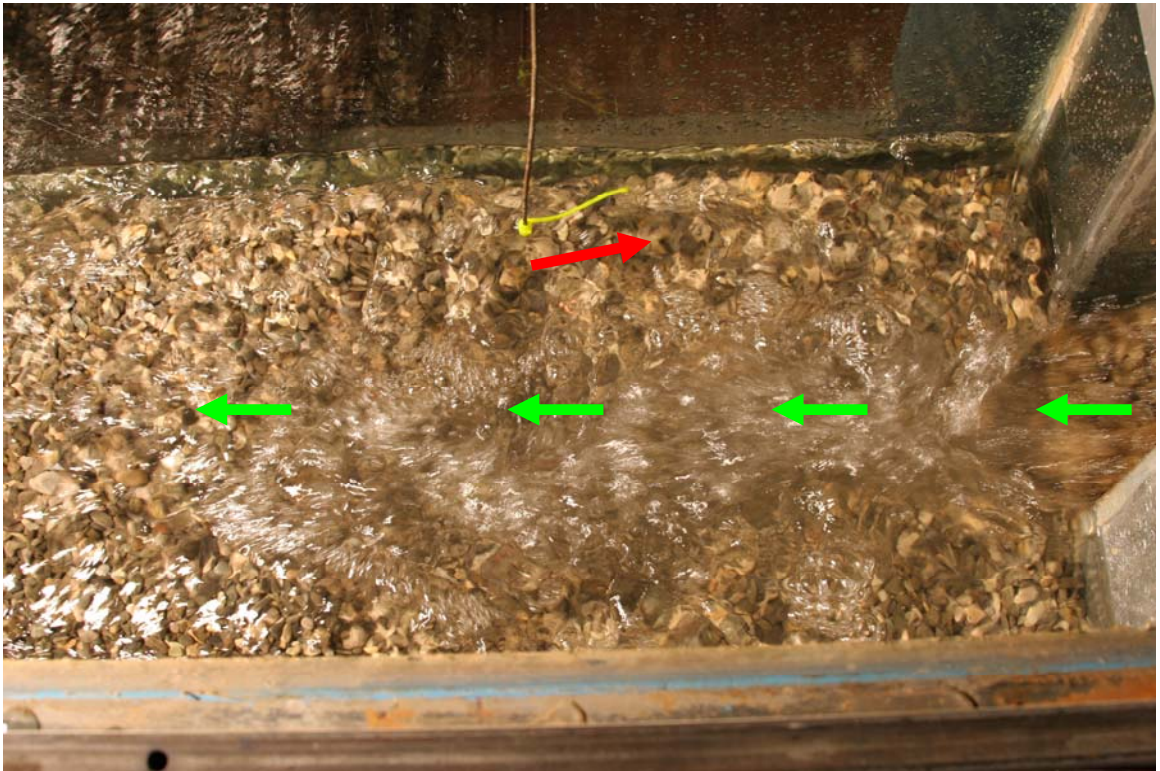
L'incremento del modulo dei filetti liquidi provoca scavi che vanno aumentando, verso gli ellissi più piccoli, in funzione degli allargamenti e delle pendenze della rampa.

Sequenza fotografica che conferma l'andamento dei filetti liquidi

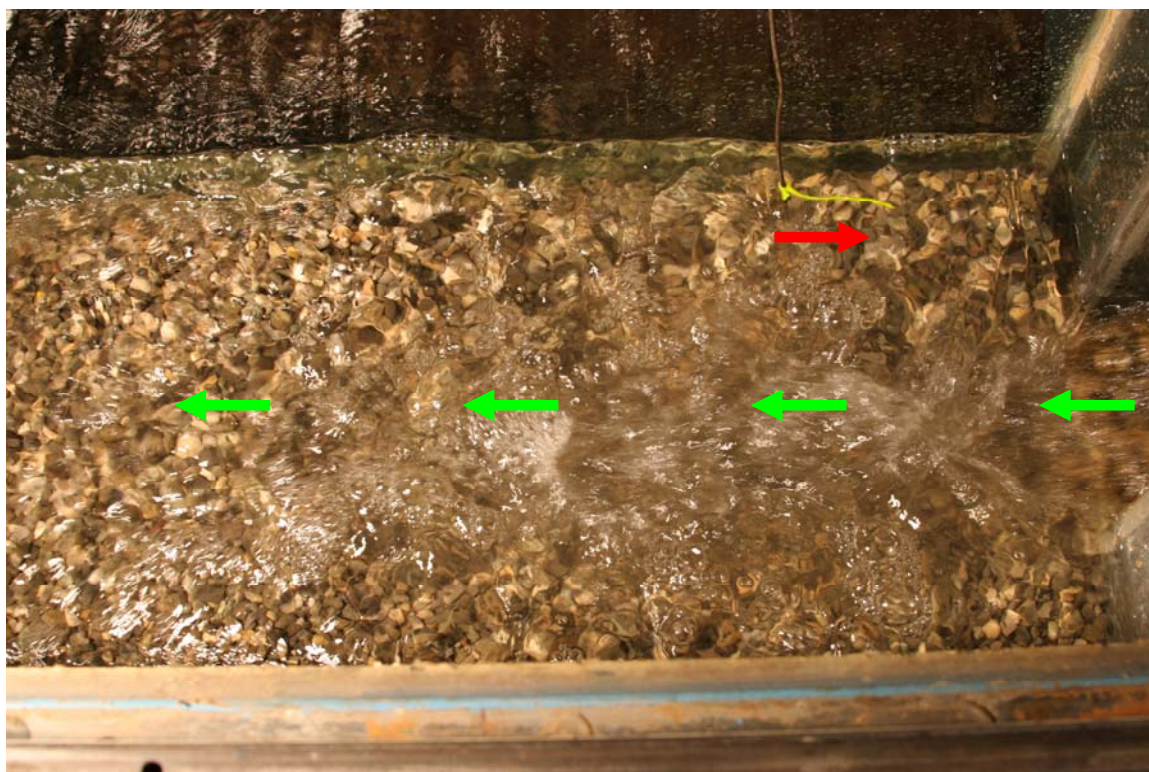


A - andamento verso l'esterno ortogonale all'asse del canale

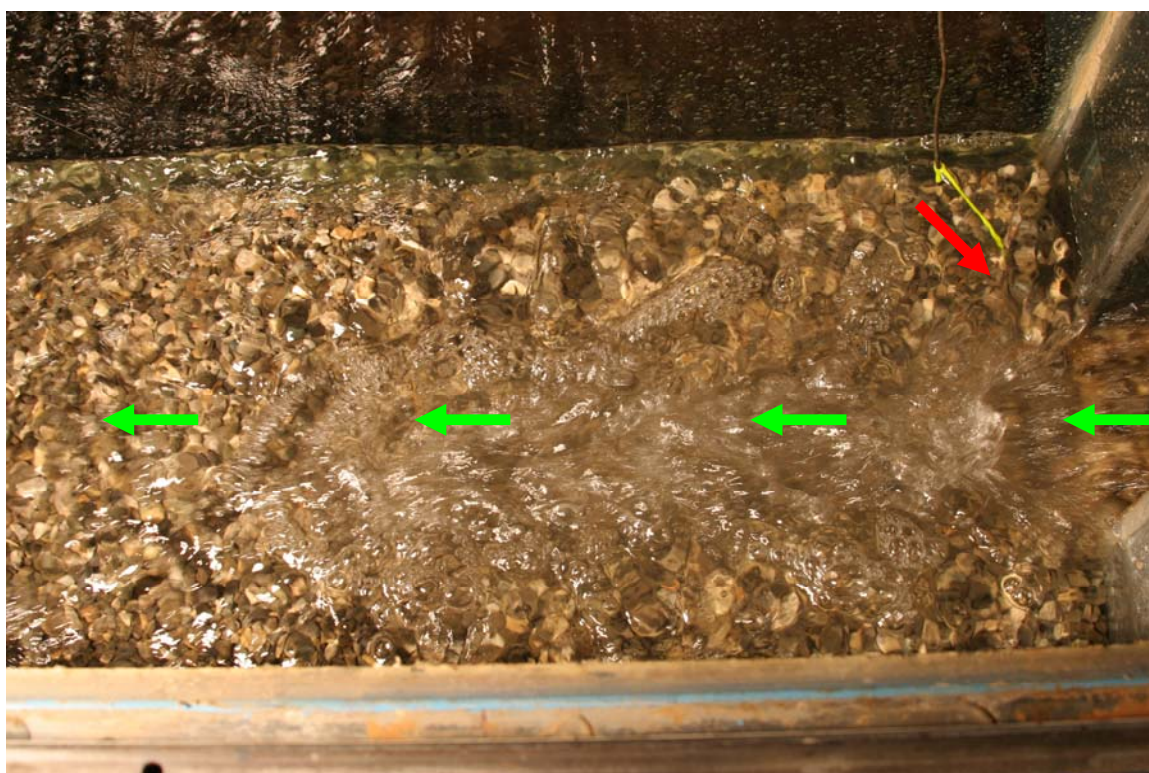
Viene evidenziato con una linea a tratto punto l'inizio del piede della duna che facilita la deviazione del filetto liquido evidenziato dal filo colore giallo immerso vicino alla superficie; con le frecce verdi si indica il verso della corrente da monte a valle e la direzione principale dei filetti lungo l'asse di simmetria del canale.



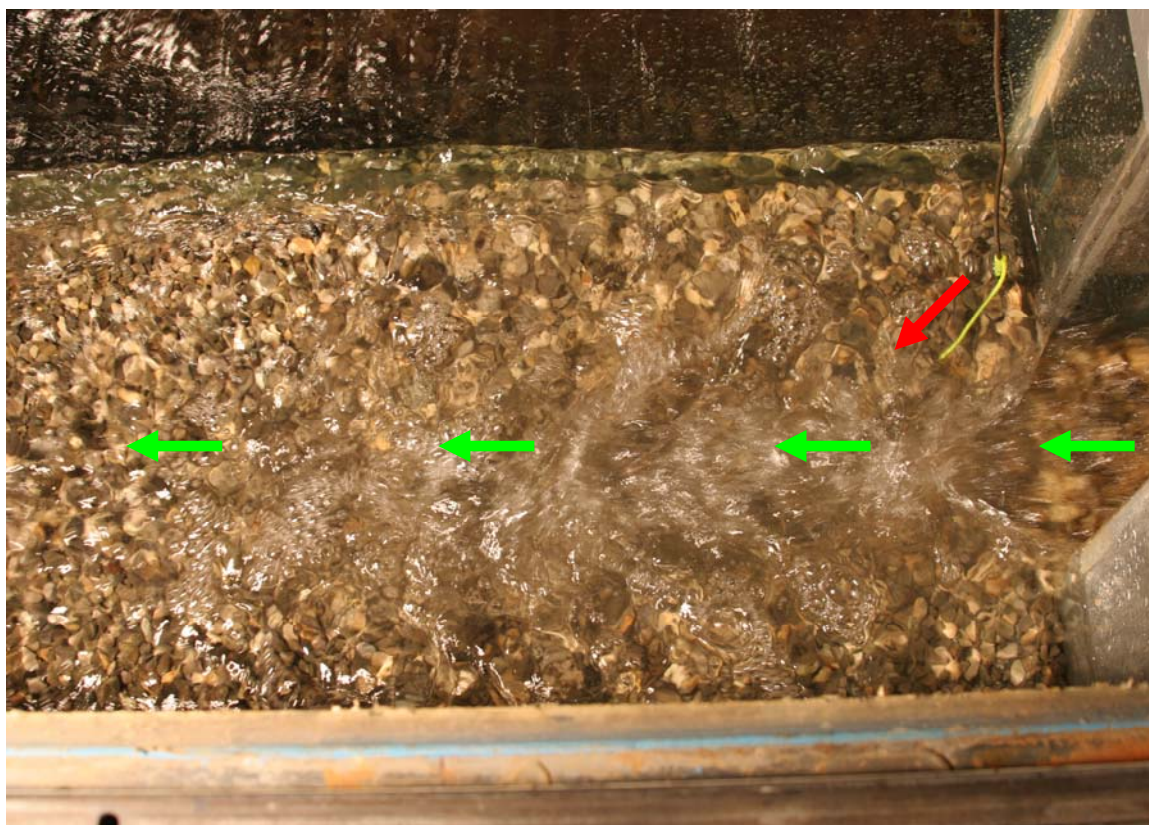
***B** –freccia rossa direzione da valle verso monte parallelo all'asse del canale*



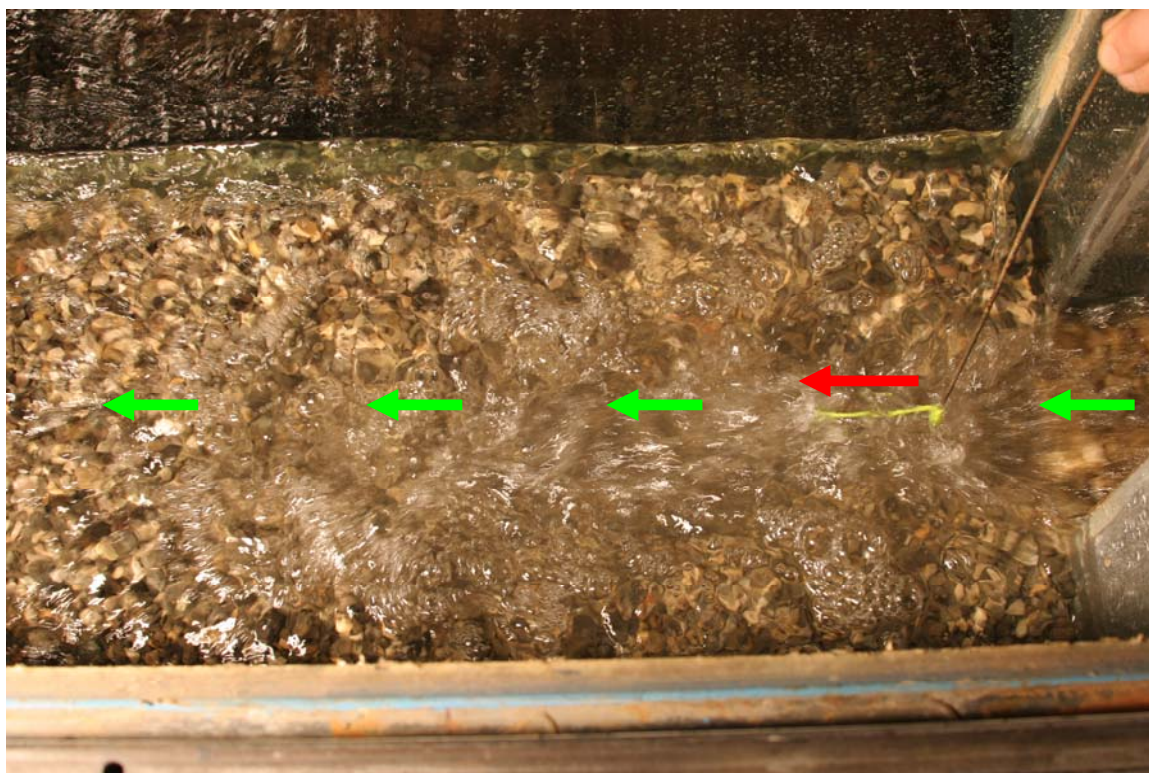
C – freccia rossa direzione da valle verso monte parallelo all'asse del canale



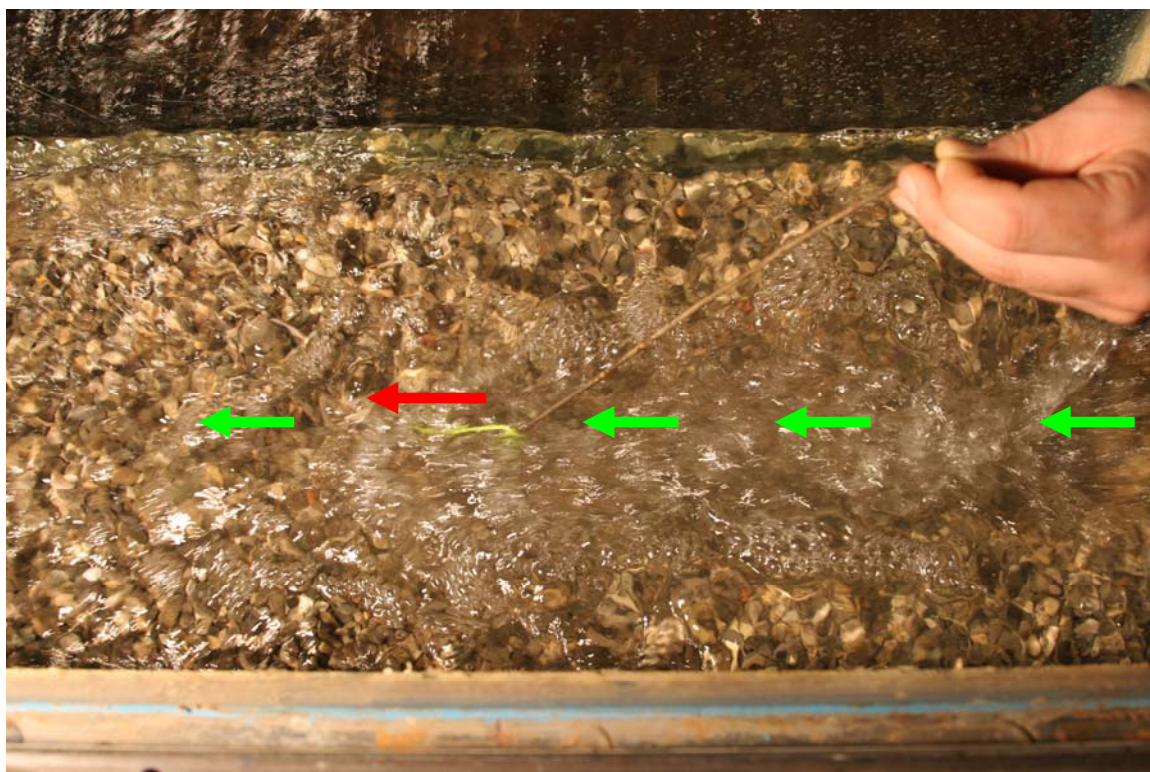
D – richiamo verso la rampa tendenza a disporsi ortogonale all'asse



E – deviazione del filetto in uscita dalla rampa

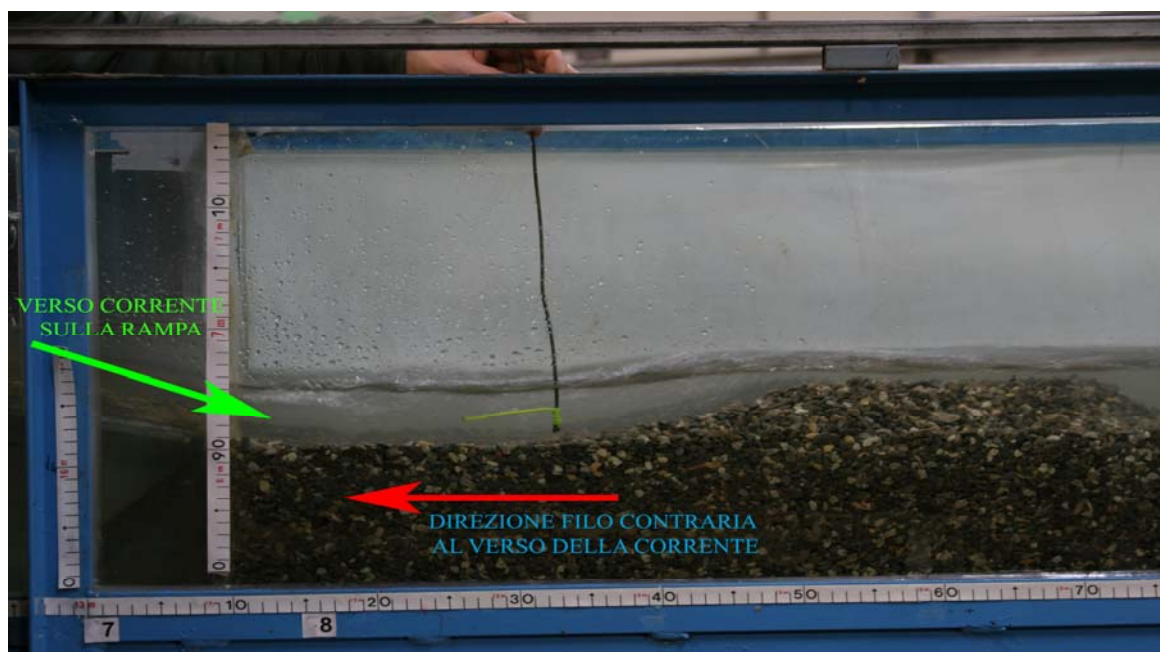


F – filetto lungo l'asse con direzione e verso da monte a valle



F – filetto lungo l'asse con direzione e verso da monte a valle

Dopo l'analisi dei filetti in superficie si procede all'analisi grafica dei filetti in profondità, notando ancora la stessa tendenza che abbiamo visualizzato in superficie. In figura 4.3.6 si può facilmente vedere che al centro del bacino la posizione è concorde mentre nella figura 4.3.7 si ha una decisa inversione, infatti lateralmente al canale il verso del filo è opposto al verso della corrente rappresentata con la freccia verde.

*Fig.4.3.6 filo immerso concorde**Fig.4.3.7 filo immerso discorde*

Sequenza andamento filo immerso



Uscita dalla rampa in posizione centrale al canale



Avvicinamento alla duna



Deviazione verso l'esterno in vicinanza della duna



Deviazione verso l'esterno in vicinanza della duna



5. Elaborazioni dati sperimentali

5.1 Premessa ai risultati sperimentali

Vengono in questo capitolo introdotti e commentati i risultati delle analisi dei processi di scavo in funzione degli allargamenti a valle della rampa in pietrame. Si è scelto di fissare il materiale del fondo mobile (materiale omogeneo ; $\sigma=1,2$) per poter valutare l'entità e la forma della escavazione in funzione dell'allargamento di valle individuato dal parametro “ λ “ , ottenuto dal rapporto tra la larghezza di valle (B) e la larghezza della rampa (b) , ed in funzione della pendenza “ i “ della rampa. Si sono testati quindi tre posizioni degli allargamenti ($\lambda=1$; $\lambda=1,8$; $\lambda=2,8$) e tre valori della pendenza i ($i=0,125$; $i=0,167$; $i=0,250$).

Le analisi condotte hanno interessato anche l'effetto del tail water dato dal rapporto dell'altezza di valle (h_0) e l'altezza in uscita al piede della rampa in pietrame (h_1); questo è stato possibile agendo sul solo organo mobile del modello, ovvero sulla paratoia di valle.

Si è cercato di individuare quali fossero le variabili più significative per descrivere il fenomeno dello scavo concentrando l'attenzione sulla profondità massima dello scavo definita dalla variabile z_{max} , ed il numero di Froude densimetrico riferito al 90% del passante in peso del materiale del fondo mobile. Per descrivere i successivi fenomeni ed ottenere un congruo termine di paragone fra il comportamento dei diversi allargamenti si richiamano alcune variabili fondamentali riguardanti il profilo di scavo, già introdotte nel capitolo 3.

Al fine di analizzare le profondità delle escavazioni:

$$\lambda = B/b$$

$$Z_{\max} = z_{\max} / h_1$$

$$Z_m = z_m / h_1$$

Si riportano ora i risultati dei valori misurati nelle prove al fine di visualizzare graficamente il complesso andamento degli scavi in funzione del fattore di allargamento λ (lambda) al variare delle pendenze i , del F_{d90} e F_{d50} .

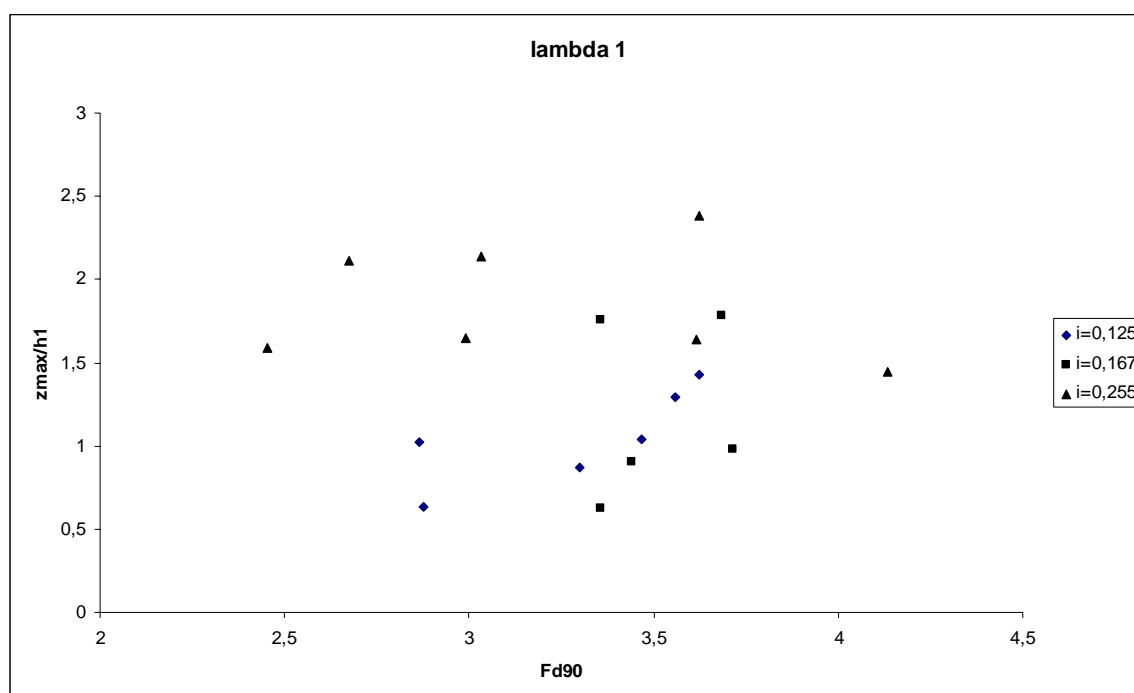


Fig 5.1.1 Grafico con fattore di allargamento $\lambda=1$ al variare di “ i ”

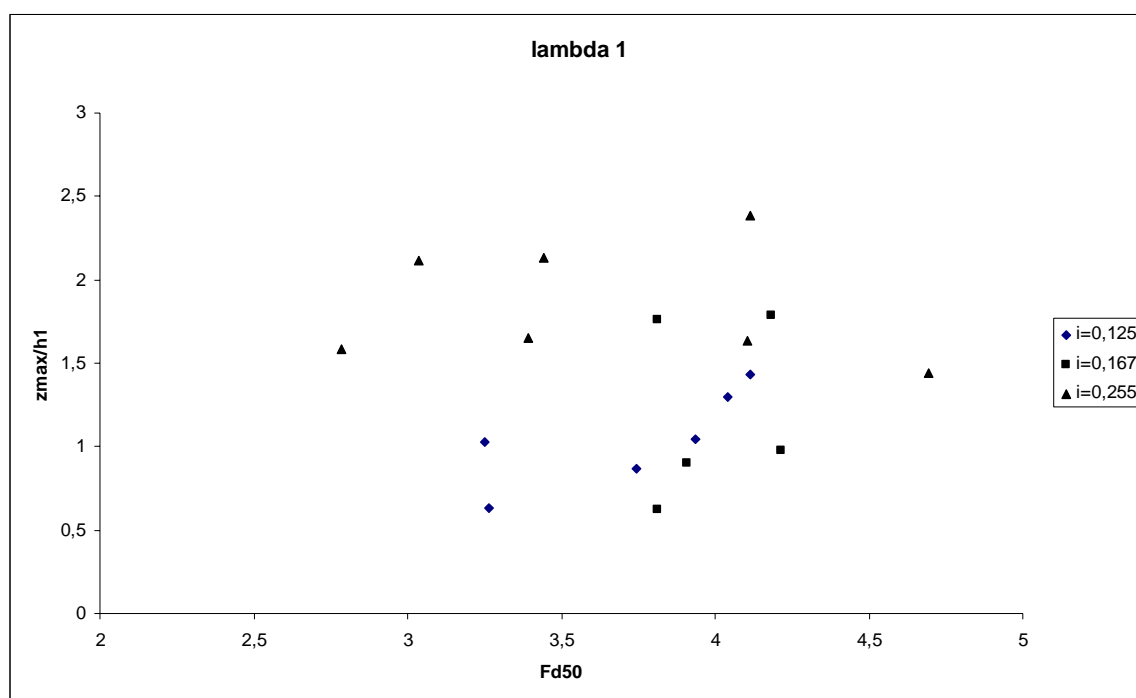


Fig 5.1.2 Grafico con fattore di allargamento $\lambda=1$ al variare di " i "

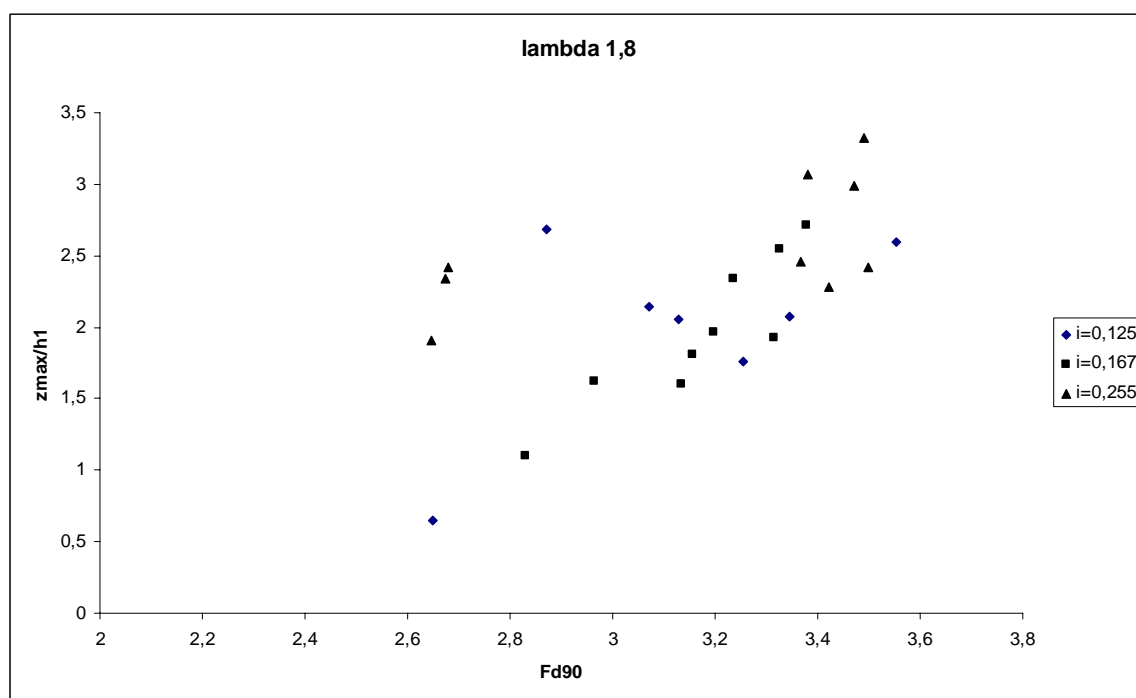


Fig 5.1.3 Grafico con fattore di allargamento $\lambda=1,8$ al variare di " i "

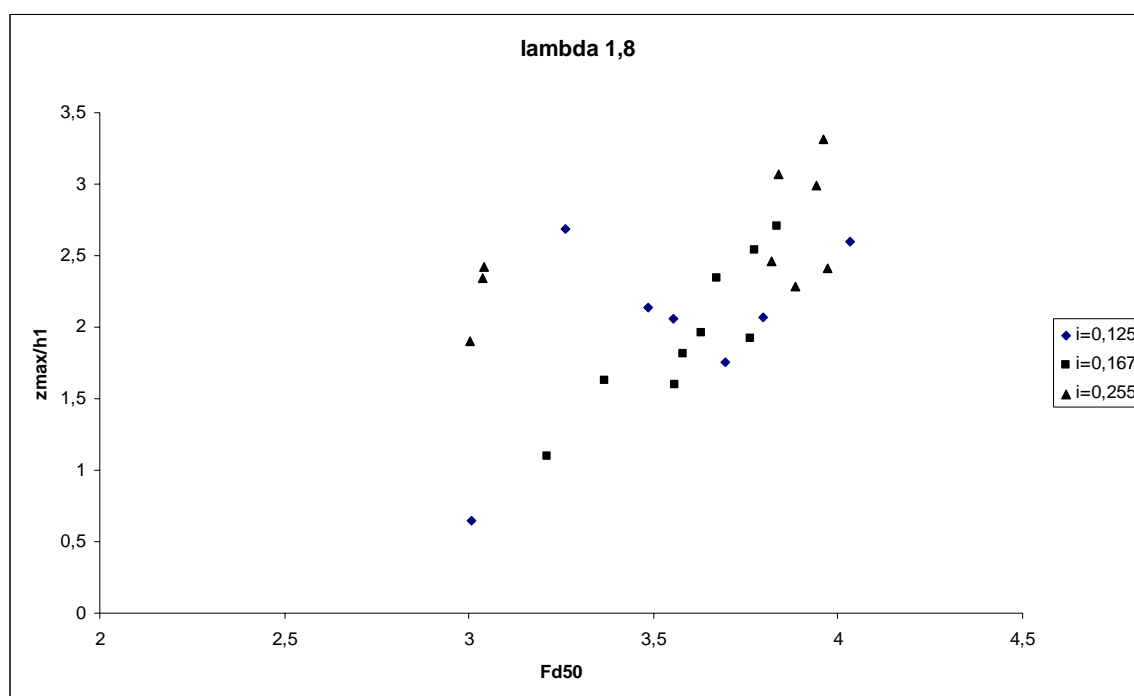


Fig 5.1.4 Grafico con fattore di allargamento $\lambda=1,8$ al variare di "i"

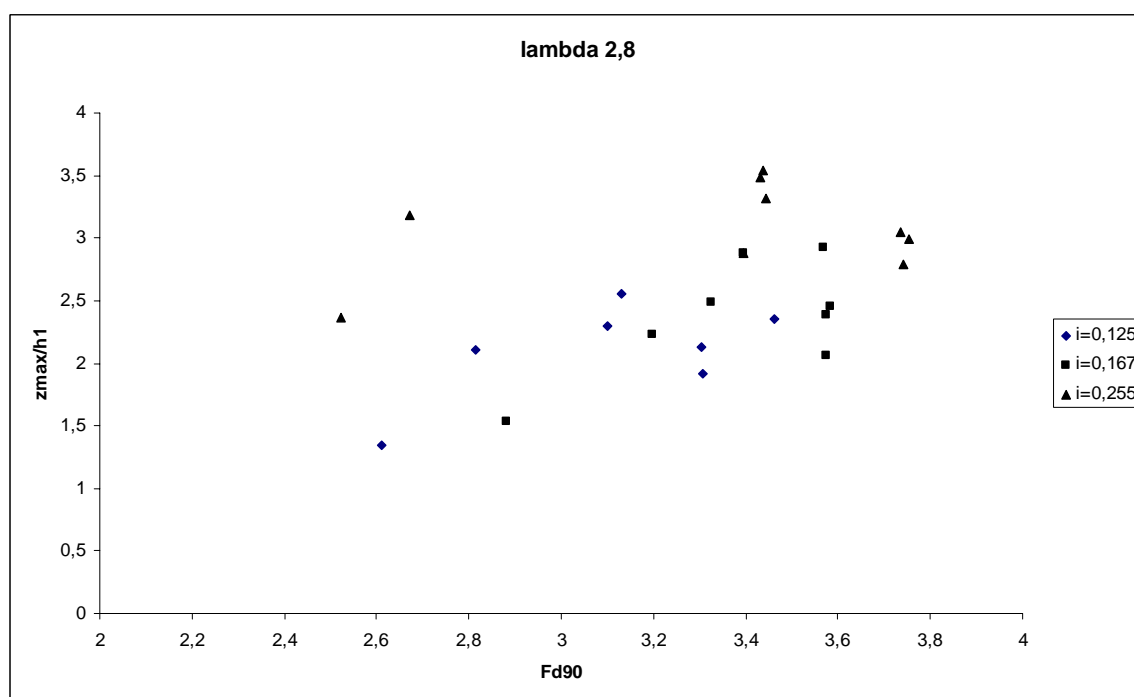


Fig 5.1.5 Grafico con fattore di allargamento $\lambda=2,8$ al variare di "i"

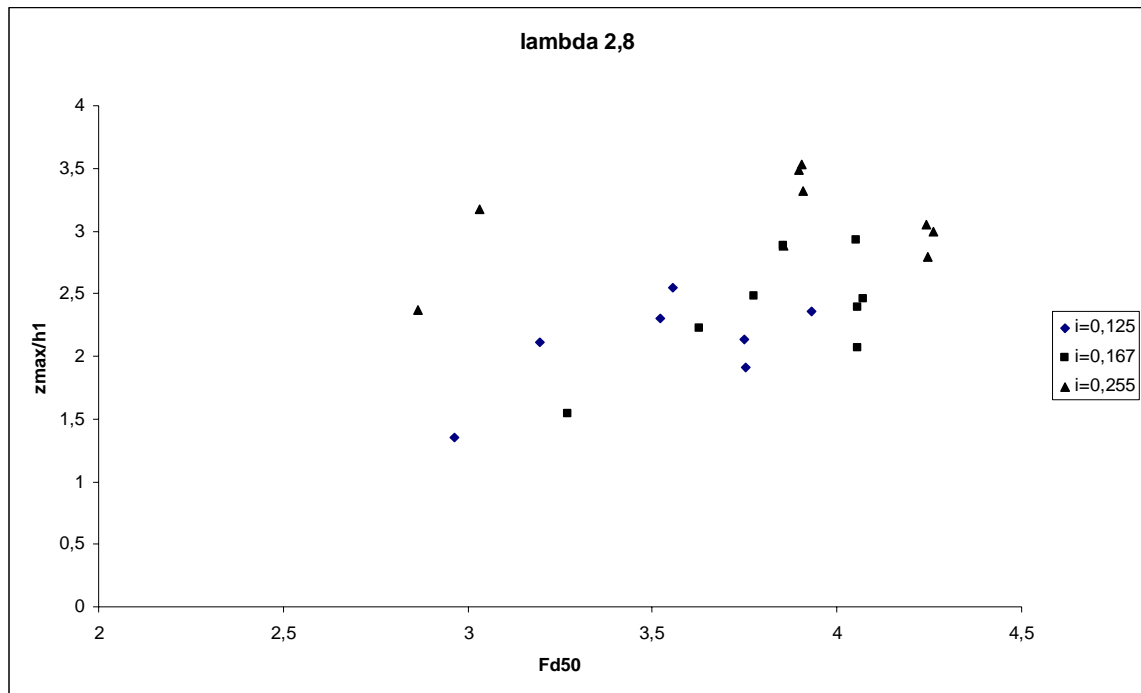


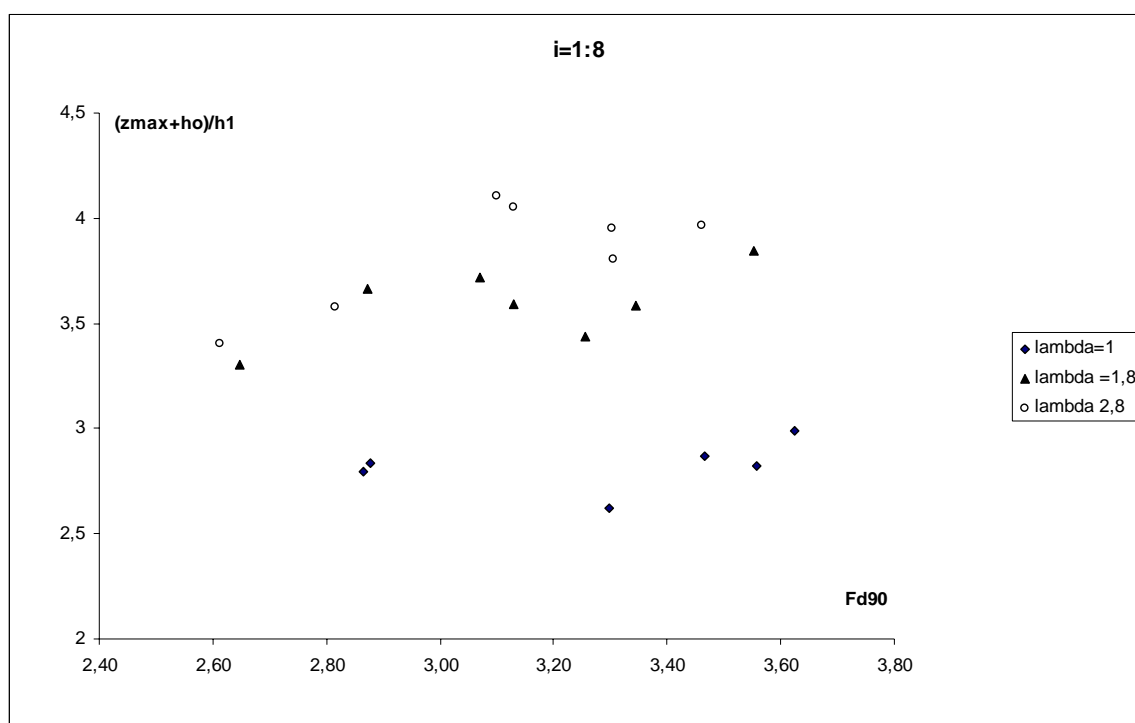
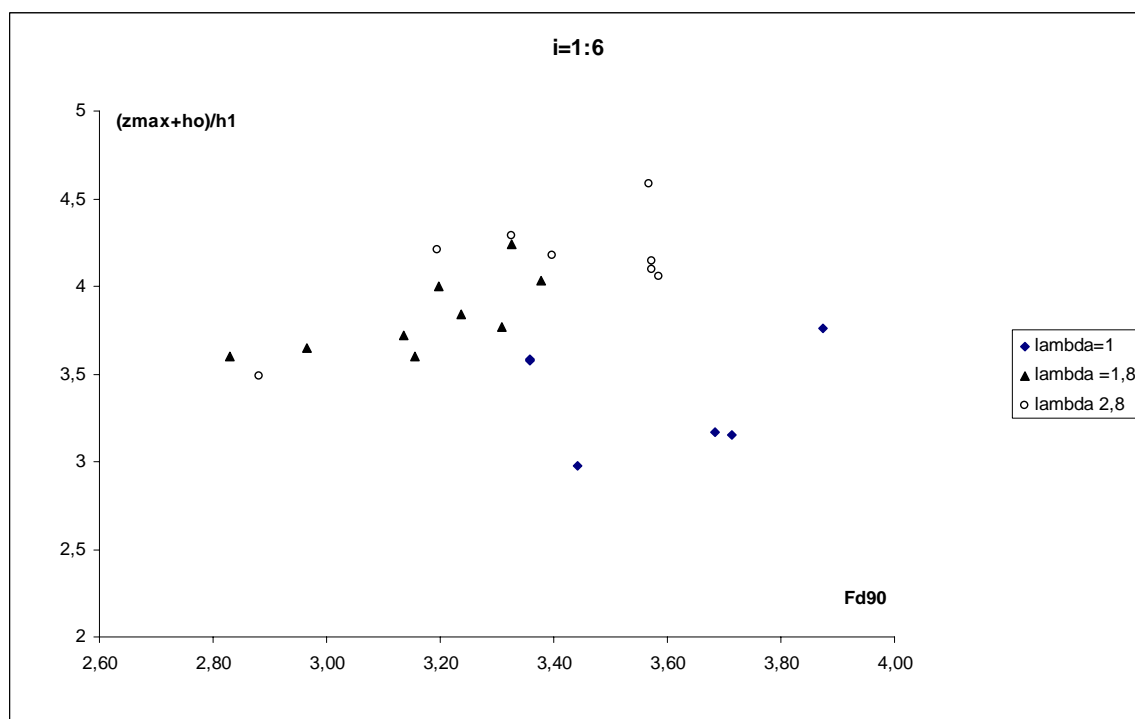
Fig 5.1.6 Grafico con fattore di allargamento $\lambda=2,8$ al variare di “i”

Si nota che non vi sono degli andamenti ben definiti, ma al contrario si presentano situazioni molto variabili. Proprio per questo motivo si è iniziato a valutare anche l'effetto del rapporto tra h_0 altezza di valle e h_1 altezza allo sbocco della rampa.

5.2 Relazioni $(z_{max}+h_0)/h_1$, F_{d90}

Utilizzando le variabili sopra riportate abbiamo messo in relazione $\frac{z_{max}+h_0}{h_1}$ con il F_{d90}

per ogni valore della pendenza come riportato nei grafici che riportano i dati misurati nelle esperienze di laboratorio.

Fig 5.2.1 Grafico a pendenza costante al variare del fattore λ Fig 5.2.2 Grafico a pendenza costante al variare del fattore λ

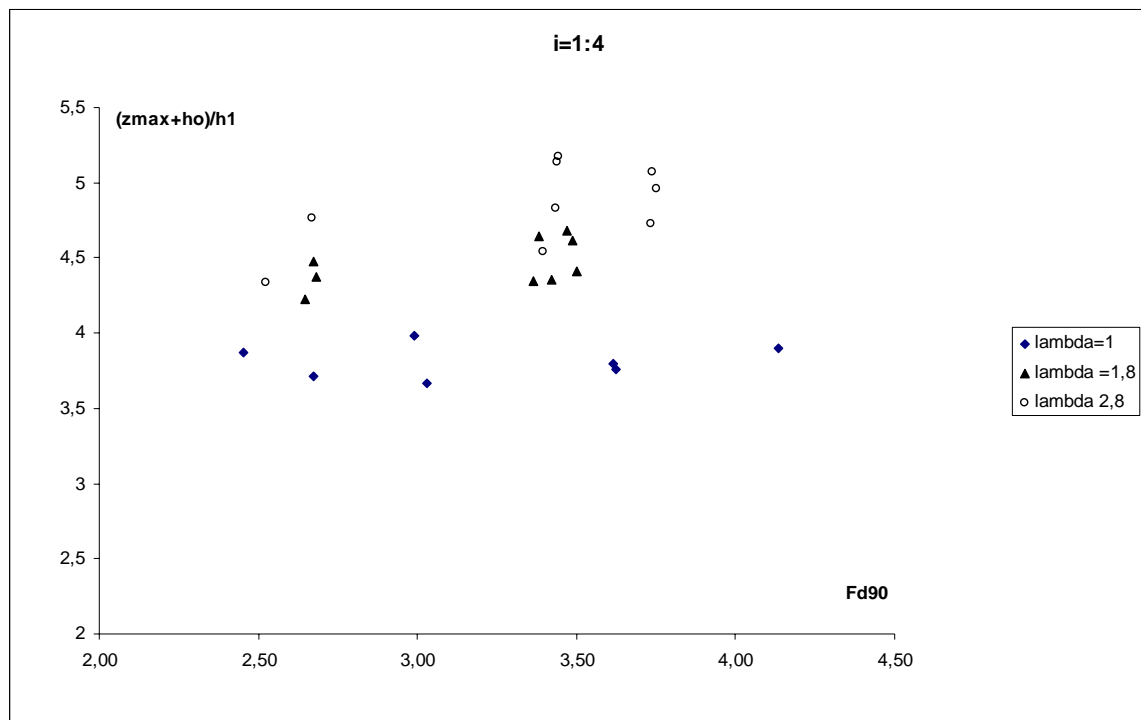


Fig 5.2.3 Grafico a pendenza costante al variare del fattore λ

Come risulta dai grafici si nota un certo trend nei raggruppamenti divisi per λ , questo ci ha permesso di iniziare la ricerca di una relazione che potesse verificare la nostra intuizione.

Dalla presentazione dei dati sperimentali raccolti da altri Autori è noto che il processo di escavazione prodotto dal getto in uscita dalla rampa, e impattante sul fondo erodibile, non è influenzato dalle caratteristiche granulometriche dei sedimenti costituenti la zona di dissipazione, almeno nei casi in cui, comunque, il materiale si può considerare uniforme.

Per ogni pendenza esaminata, sono stati presi in considerazione i dati sperimentali relativi alle prove che fanno capo alle seguenti ipotesi:

1. capacità di trasporto solido della corrente tale da determinare la formazione di una zona di deposito a valle dello scavo che si ha al piede della rampa;
2. sviluppo del risalto idraulico al piede del manufatto

Vengono, pertanto, esclusi dal presente studio i dati sperimentali relativi alle prove in cui non si ha formazione della duna a valle dello scavo e quelle in cui si ha formazione di un risalto annegato.

Infatti tali prove danno luogo a profili di fondo con caratteristiche ben diverse da quelle relative ai test eseguiti nelle ipotesi dette in precedenza, ed inoltre il numero delle prove suddette è ridotto, per cui possono fornire solo un'indicazione sui parametri che influenzano il fenomeno.

Dopo aver effettuato regressioni di tipo diverso (lineare, polinomiale, di tipo potenza) è emerso che tra le funzioni elaborate la forma definitiva di curva più aderente ai nostri dati, ovvero che presenta un maggior coefficiente di correlazione, ha la seguente forma:

$$\frac{z_{\max} + h_0}{h_1} = A(\lambda) \cdot \text{Exp}(B(\lambda) \cdot Fd_{90}) \quad (6.2)$$

Da questa funzione attraverso le esperienze eseguite abbiamo iniziato a ricercare i valori dei parametri A e B in modo da legarli a loro volta con un altro legame funzionale.

I valori relativi alle pendenze investigate ed ai fattori di allargamento λ hanno dato i seguenti valori:

per rampa a pendenza $i=0,250$

A1=3,734 B1=0,006

A2=3,846 B2=0,046

A3=3,729 B3=0,077

per rampa a pendenza $i=0,167$

A1=2,688 B1=0,043

A2=1,991 B2=0,197

A3=2,084 B3=0,202

per rampa a pendenza $i=0,125$

A1=2,415 B1=0,0475

A2=2,528 B2=0,113

A3=2,892 B3=0,0903

Attraverso l'analisi dei dati misurati e riportati in tabella si sono ottenuti confrontando i valori dei coefficienti A1,A2,A3 e B1,B2,B3 in funzione delle varie pendenze le funzioni quadratiche associate e di seguito riportate:

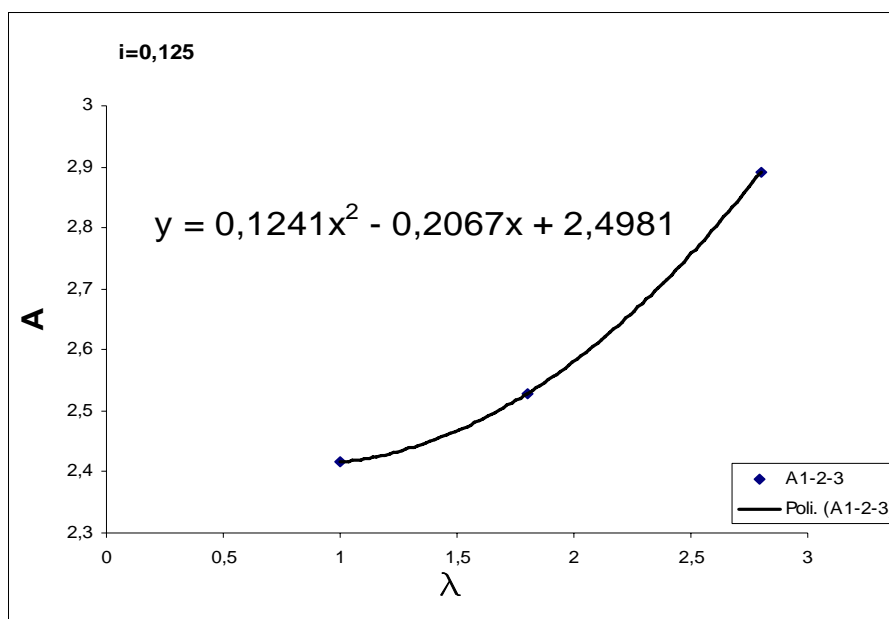


Fig 5.2.4 Grafico con curva interpolante parametro A per pendenza $i=0,125$

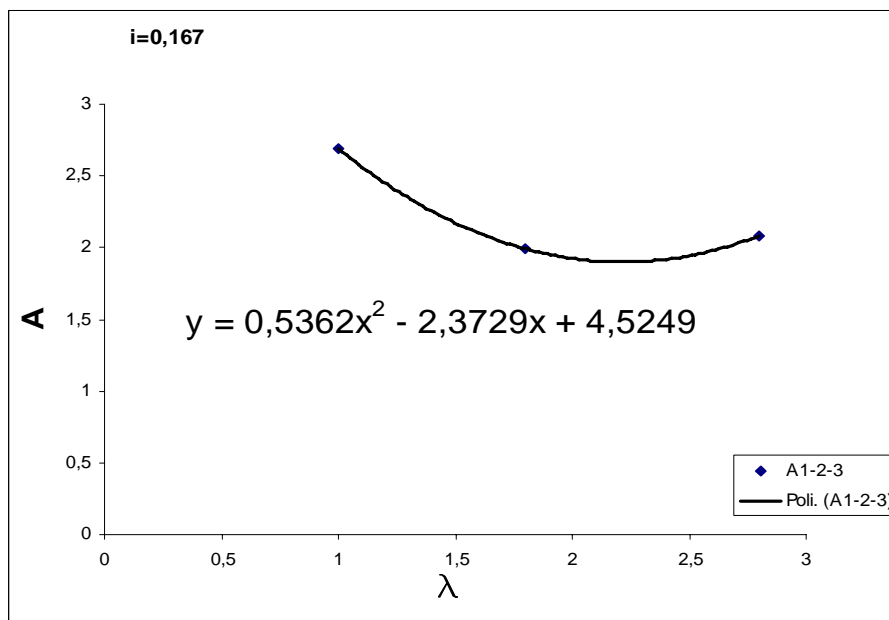
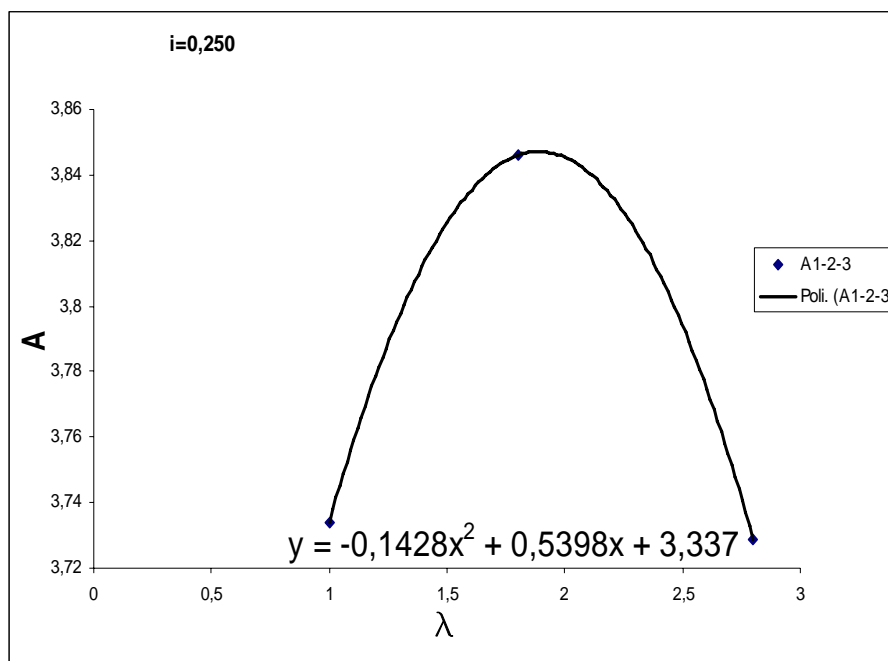
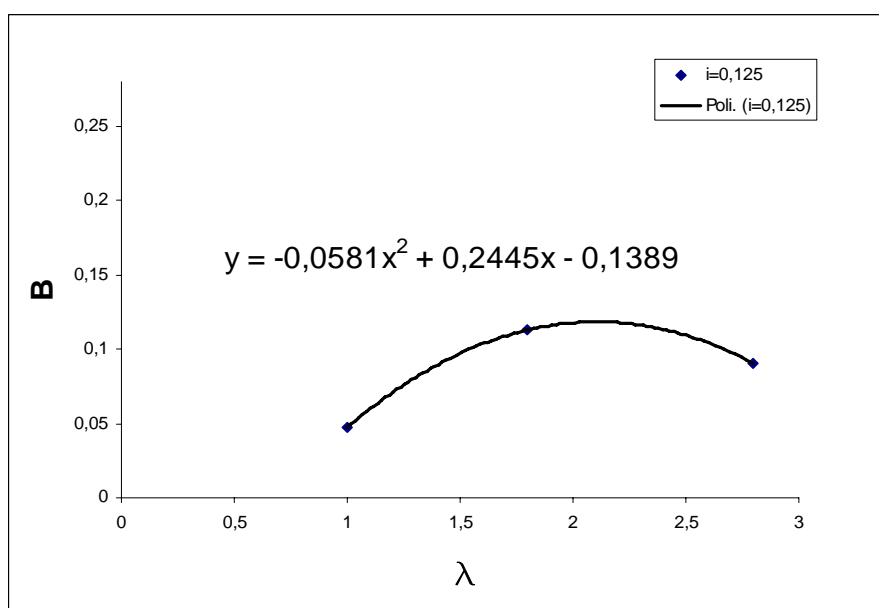


Fig 5.2.5 Grafico con curva interpolante parametro A per pendenza $i=0,167$

Fig 5.2.6 Grafico con curva interpolante parametro A per pendenza $i=0,250$ Fig 5.2.7 Grafico con curva interpolante parametro B per pendenza $i=0,125$

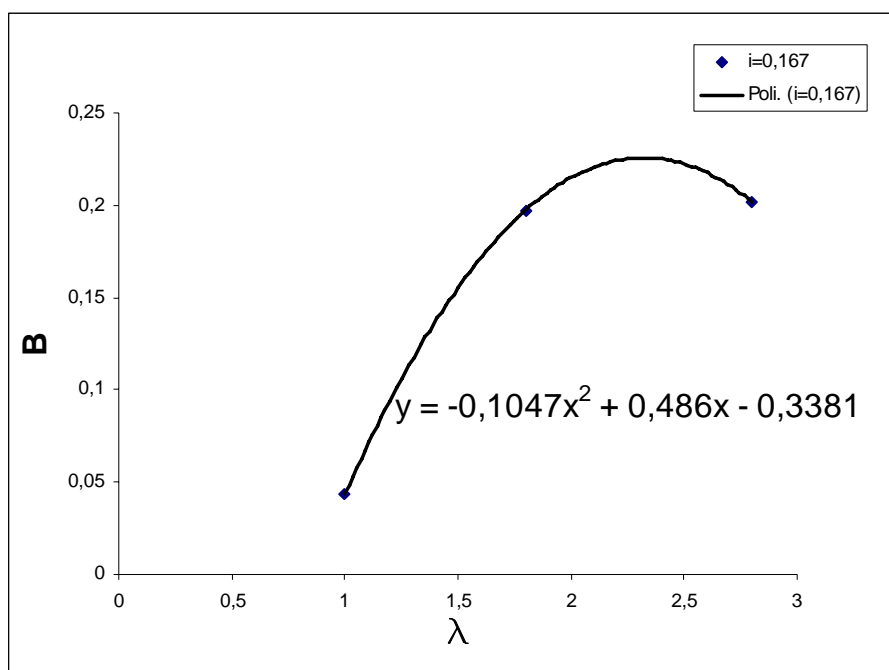


Fig 5.2.8 Grafico con curva interpolante parametro B per pendenza $i=0,167$

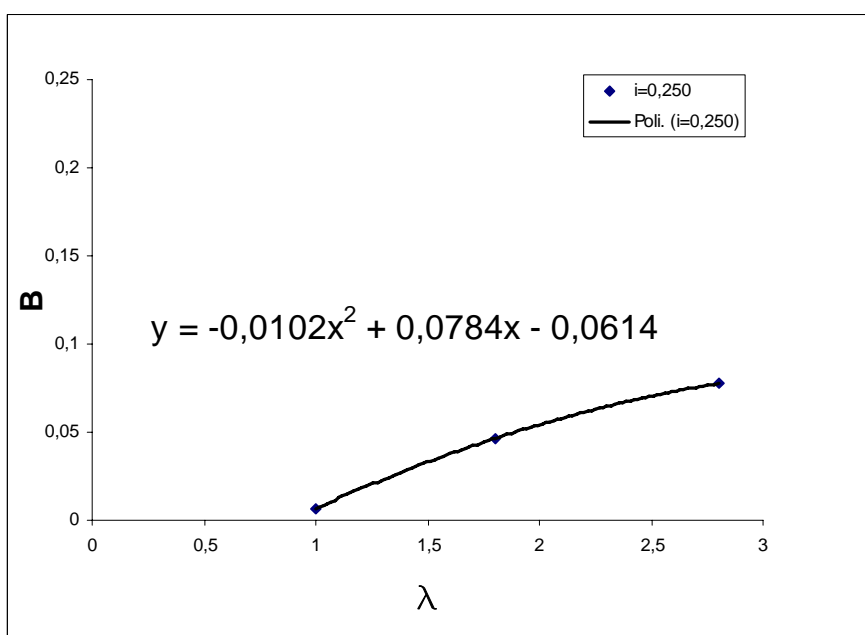


Fig 5.2.9 Grafico con curva interpolante parametro B per pendenza $i=0,250$

Si riportano le funzioni a cui appartengono i coefficienti A e B per le pendenze investigate:

per una pendenza della rampa $i=0,125$

$$A(\lambda) = 0,1241 \cdot \lambda^2 - 0,2067 \cdot \lambda + 2,4981$$

$$B(\lambda) = -0,0581 \cdot \lambda^2 + 0,2445 \cdot \lambda - 0,1389$$

per una pendenza della rampa $i=0,167$

$$A(\lambda) = 0,5362 \cdot \lambda^2 - 2,3729 \cdot \lambda + 4,5249$$

$$B(\lambda) = -0,1047 \cdot \lambda^2 + 0,486 \cdot \lambda + 3,3381$$

per una pendenza della rampa $i=0,250$

$$A(\lambda) = -0,1428 \cdot \lambda^2 - 0,5398 \cdot \lambda + 3,337$$

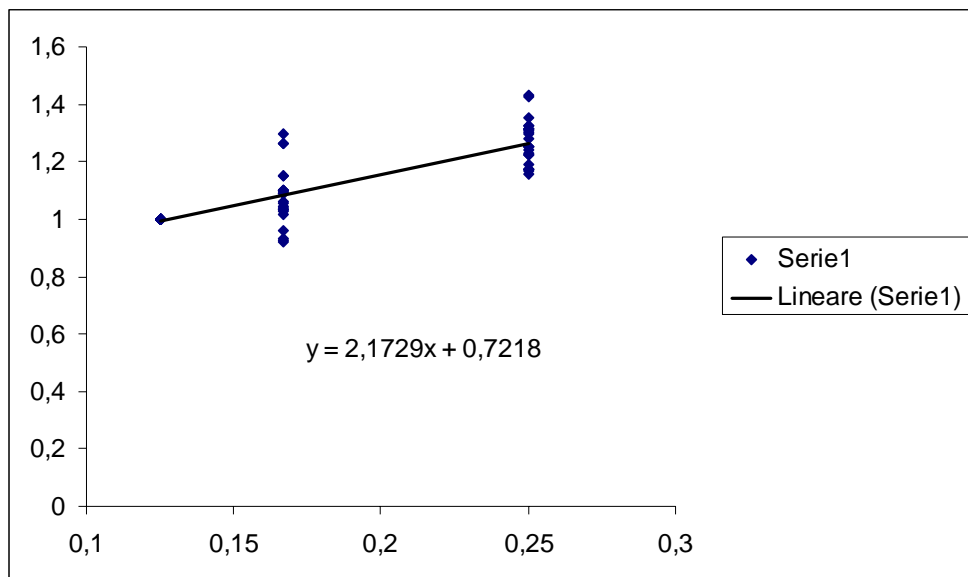
$$B(\lambda) = -0,0102 \cdot \lambda^2 + 0,0784 \cdot \lambda - 0,0614$$

Attraverso queste equazioni si ricerca la funzione nella sola incognita “ i “ attraverso il seguente rapporto:

$$\frac{[(z_{\max} + h_0) / h_1]_{\text{calc}}}{[(z_{\max} + h_0) / h_1]_{\text{mis}}} = f(i)$$

lambda	f(i)	lambda	f(i)	lambda	f(i)
0,125	1	0,167	1,2948	0,25	1,311516
0,125	1	0,167	1,099678	0,25	1,315657
0,125	1	0,167	1,263661	0,25	1,326548
0,125	1	0,167	1,094494	0,25	1,325203
0,125	1	0,167	1,046162	0,25	1,430901
0,125	1	0,167	1,261331	0,25	1,352967
0,125	1	0,167	0,922439	0,25	1,426701
0,125	1	0,167	1,089585	0,25	1,174175
0,125	1	0,167	1,151546	0,25	1,231687
0,125	1	0,167	0,957558	0,25	1,27756
0,125	1	0,167	1,10265	0,25	1,170835
0,125	1	0,167	1,034737	0,25	1,249846
0,125	1	0,167	0,92575	0,25	1,239529
0,125	1	0,167	1,054109	0,25	1,175576
0,125	1	0,167	1,031813	0,25	1,254038
0,125	1	0,167	1,014422	0,25	1,30818

0,125	1	0,167	1,062177	0,25	1,167994
0,125	1	0,167	1,098676	0,25	1,224132
0,125	1	0,167	1,037551	0,25	1,294478
0,125	1	0,167	1,091137	0,25	1,251219
0,125	1	0,167	1,026868	0,25	1,311329
		0,167	1,149707	0,25	1,156402
		0,167	0,931005	0,25	1,223446
				0,25	1,303509
				0,25	1,192942

Fig 5.2.10 Grafico con funzione lineare $f(i)$

La cui funzione ci permette di ricavare il $\frac{z_{\max} + h_0}{h_1}$ calcolato definitivo .

$$f(i) = 2,1729 \cdot i + 0,7218$$

$$\left(\frac{z_{\max} + h_0}{h_1} \right)_{\text{calc}} \cdot f(i) = \left(\frac{z_{\max} + h_0}{h_1} \right)_{\text{CALDEF}}$$

Le precedenti considerazioni ci permettono di individuare la funzione definitiva espressa dalla relazione :

$$\frac{z_{\max} + h_0}{h_1} = [A(\lambda) \cdot \text{Exp}(B(\lambda) \cdot Fd_{90})] \cdot f(i) \quad (5.6)$$

$$\frac{z_{\max} + h_0}{h_1} = [A(\lambda) \cdot \text{Exp}(B(\lambda) \cdot Fd_{90})] \cdot (2,1729 \cdot i + 0,7218)$$

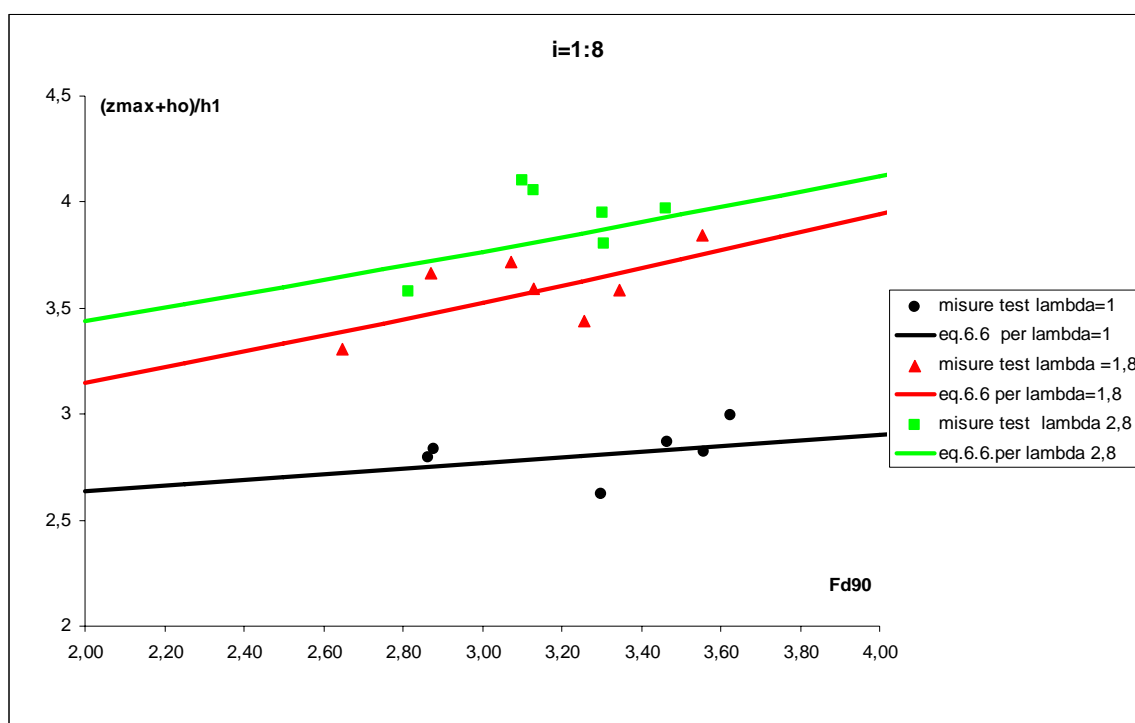
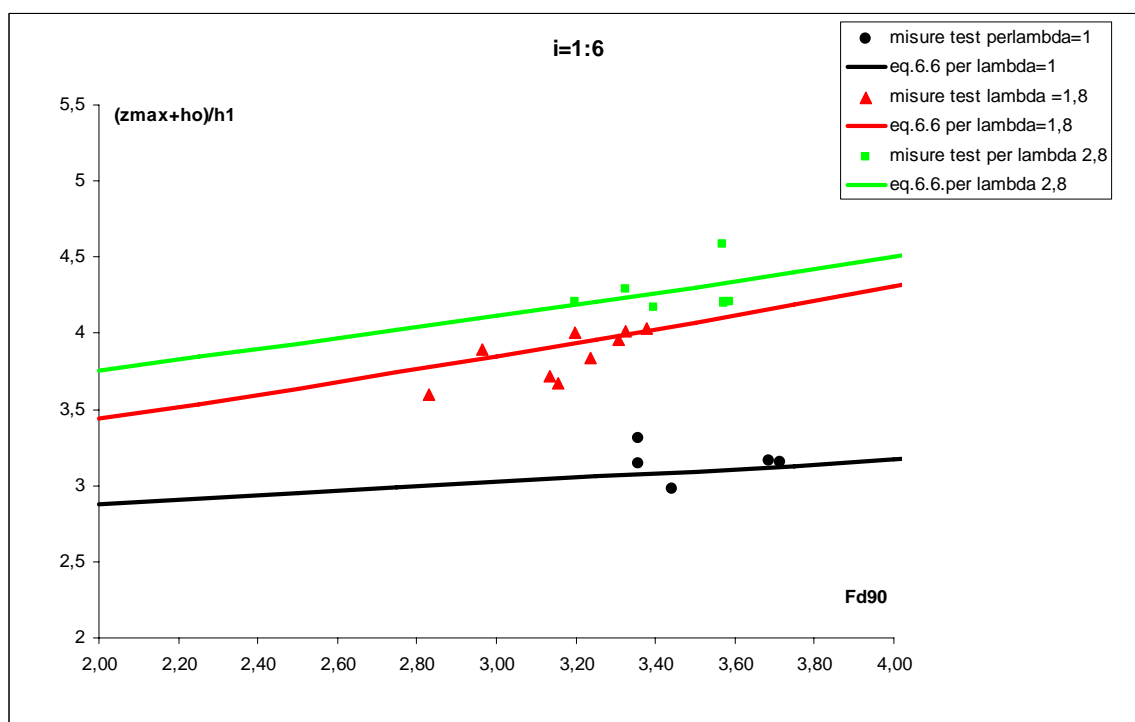
$$\frac{z_{\max} + h_0}{h_1} = \left[(0,12 \cdot \lambda^2 - 0,21 \cdot \lambda + 2,5) \cdot e^{(-0,059 \cdot \lambda^2 + 0,24 \cdot \lambda - 0,14) \cdot Fd_{90}} \right] \cdot (2,17 \cdot i + 0,72)$$

Relazione che è funzione del solo fattore di allargamento λ dato dal rapporto della larghezza a valle della rampa e la larghezza della rampa stessa e della sua pendenza i .

Nelle figure seguenti sono riportati i valori misurati nelle nostre prove di laboratorio ed in tratto continuo è rappresentato l'andamento della funzione (5.6) in funzione dell'allargamento a valle della rampa per ogni pendenza investigata.

Campo di validità

- $1 < \lambda < 2,8$
- $2,5 < Fd_{90} < 4,5$
- Condizioni di moto caratterizzati dalla formazione di deposito a valle dello scavo

Fig 5.2.11 Grafico con funzione (5.6) $i=0,125$ Fig 5.2.12 Grafico con funzione (5.6) $i=0,167$

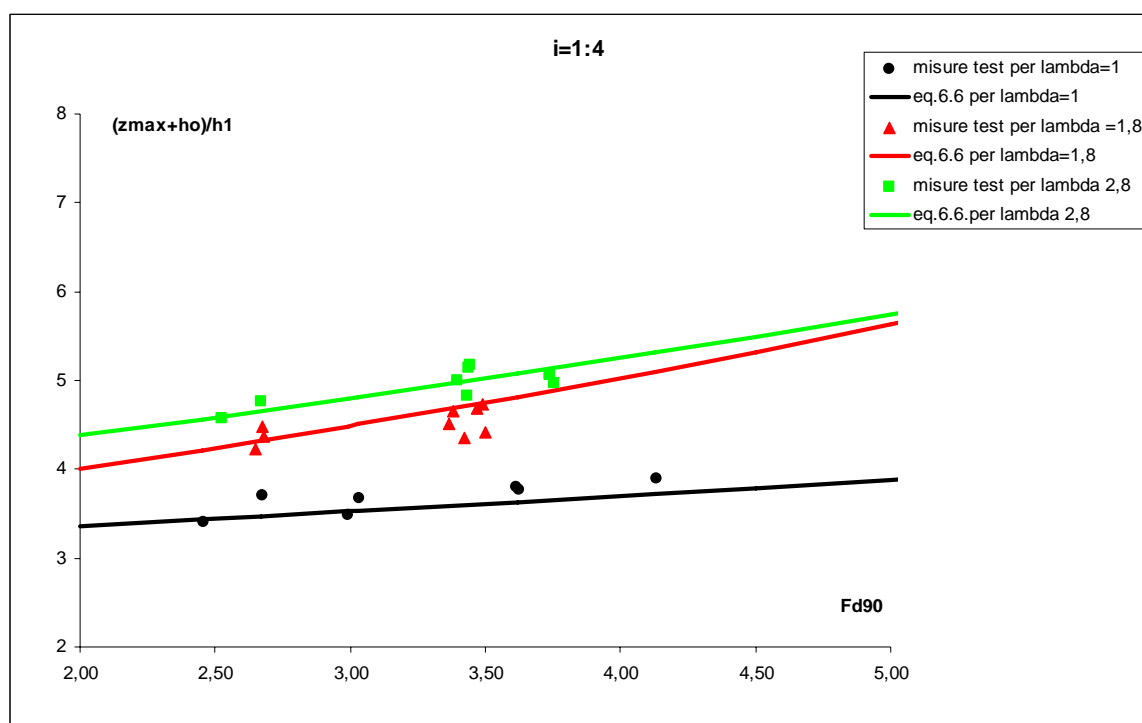


Fig 5.2.13 Grafico con funzione (5.6) $i=0,250$

Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori calcolati dalle nostre prove e quelli derivanti da altri autori. Tutti i risultati confrontati hanno dato esito soddisfacente di confronto tra il valore misurato e quello calcolato come riportato in figura 5.2.13.

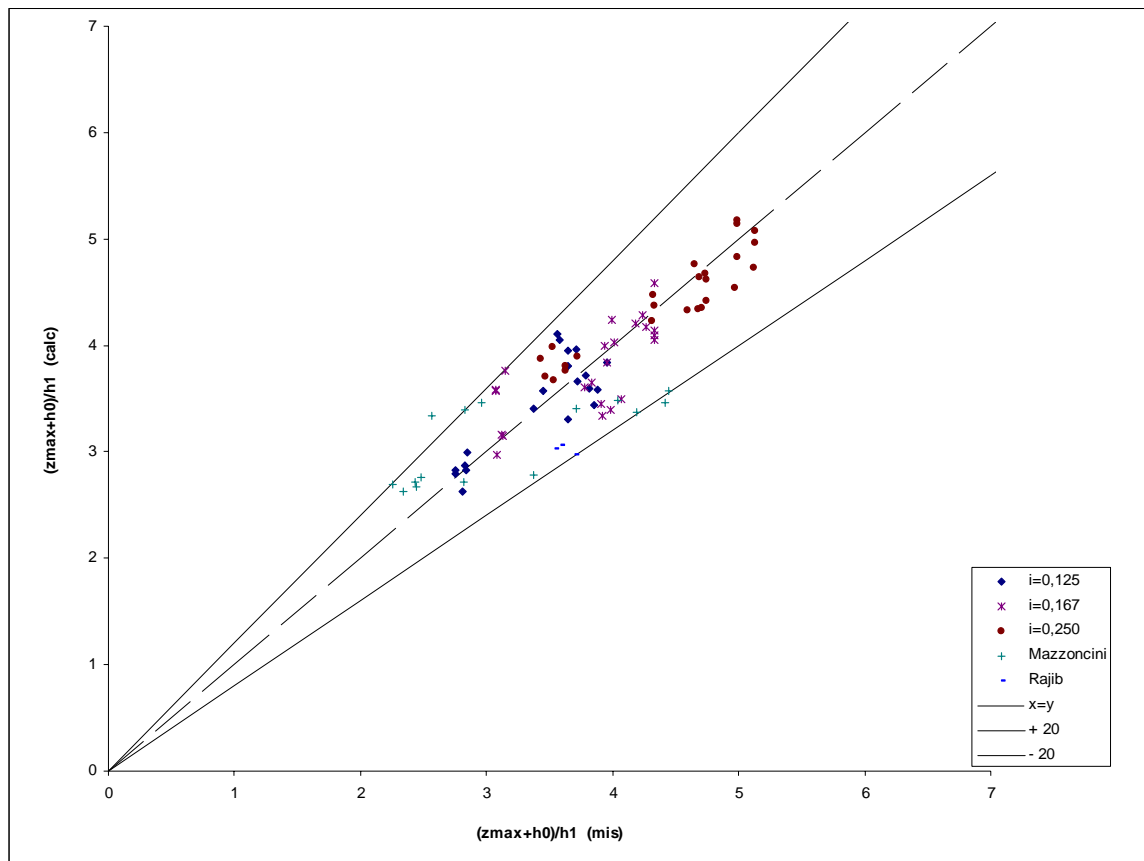


Fig 5.2.13 Grafico confronto valori misurati –calcolati con funzione 5.6

5.3 Relazioni Z_{\max}/Z_m , Fd_{90}

Altra grandezza che consente di caratterizzare lo scavo originatosi a valle della rampa è la profondità media della fossa di erosione. Come detto in precedenza, nel corso delle prove è emerso che la corrente al piede della rampa non ha andamento uniforme sulla sezione trasversale producendo così a valle scavi che presentano sezioni molto varie.

In figura 5.3.1 si riporta la grandezza adimensionale Z_{\max}/Z_m in funzione del numero di Froude densimetrico Fd calcolato considerando il d_{90} come diametro caratteristico del materiale costituente il fondo mobile.

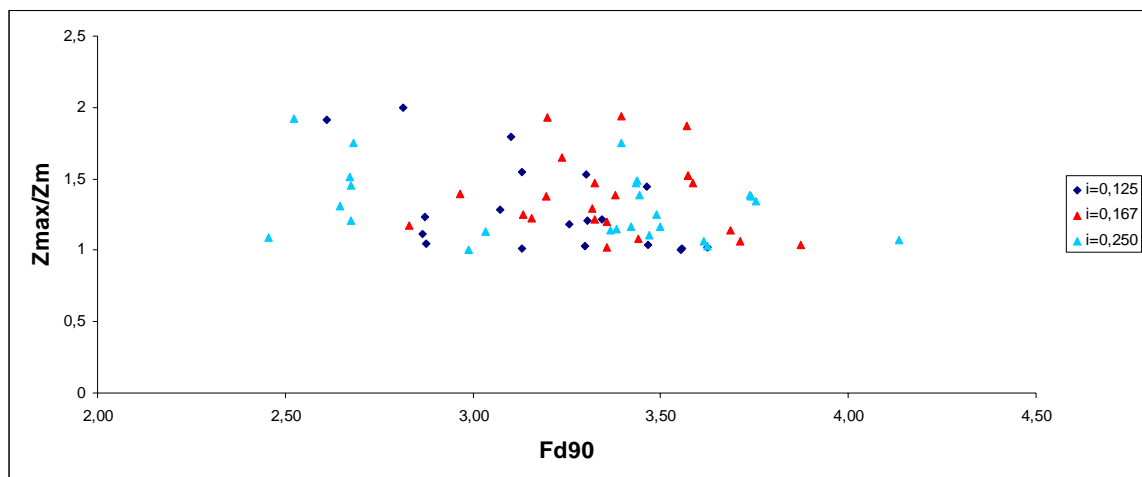


Fig 5.3.1 Relazione tra Z_{\max}/Z_m in funzione di Fd_{90} al variare di i

Il grafico sembra non mettere in evidenza un trend ben definito dei dati. Tuttavia, escludendo i dati che si allontanano maggiormente dall'andamento medio, possiamo dire che il rapporto tra scavo massimo e scavo medio risulta mediamente di 1,3 indipendentemente dalla pendenza della rampa.

La dispersione dei dati non ha andamento diversificato per le tre pendenze indagate in quanto in tutti i casi si hanno valori che si dispongono tra il massimo ed il minimo. Inoltre possiamo dedurre che la pendenza non ha molta influenza sulla variabilità del rapporto Z_{\max}/Z_m .

Sembra più interessante l'analisi dei dati Z_{\max}/Z_m in funzione del fattore di allargamento (figura 5.3.2), dove si nota invece la tendenza ad allontanarsi del valore di z_{\max} rispetto al valore z_m con l'aumentare del fattore di allargamento λ .

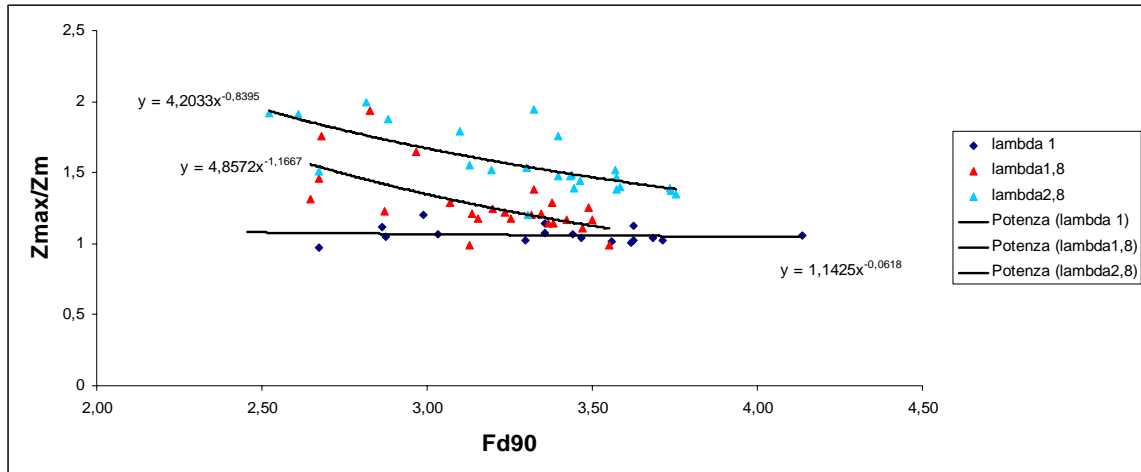
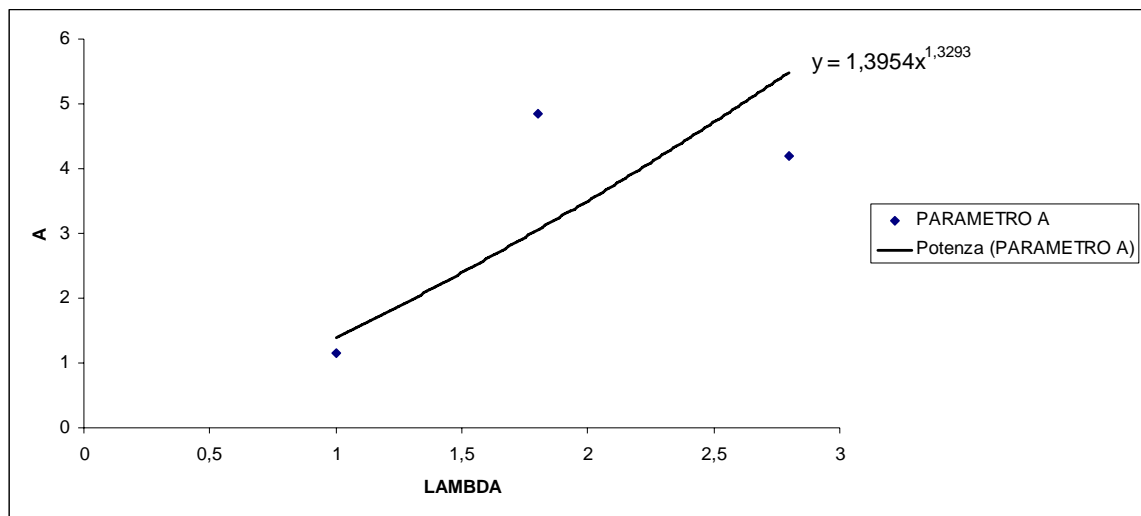


Fig 5.3.2 Relazione tra Z_{\max}/Z_m in funzione di F_{d90} al variare di λ

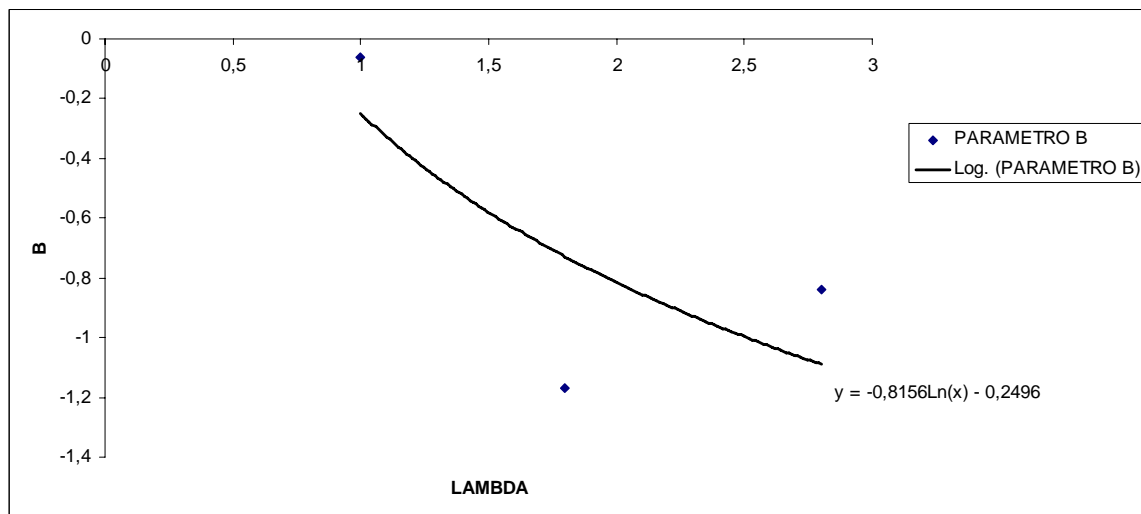
In questa ottica abbiamo individuato la relazione che meglio interpola i coefficienti delle equazioni di potenza ricercando una relazione funzionale del tipo:

$$\frac{Z_{\max}}{Z_m} = A(\lambda) \cdot F_{d90}^{B(\lambda)}$$

Ricerca della funzione $A(\lambda)$:

Fig 5.3.3 Relazione A in funzione di λ

Ricerca parametro B(λ):

Fig 5.3.4 Relazione B in funzione di λ

Si è ricavato quindi:

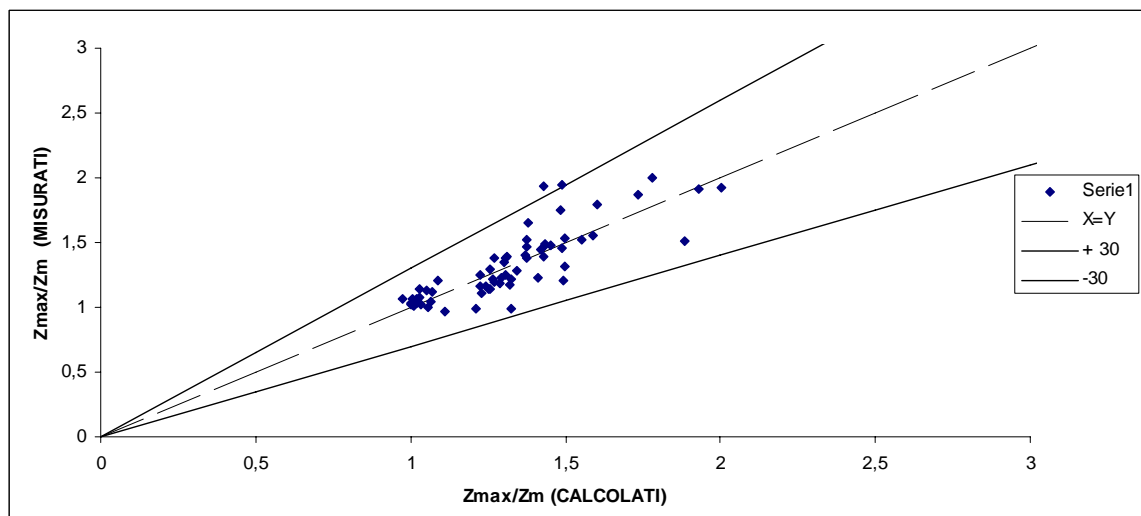
$$A(\lambda) = 1,39 \cdot \lambda^{1,33}$$

$$B(\lambda) = -0,81 \cdot \ln(\lambda) - 0,25$$

Da cui l'equazione cercata è del tipo:

$$\frac{Z_{\max}}{Z_m} = (1,39 \cdot \lambda^{1,33}) \cdot F_{d90}^{(-0,81 \cdot \ln \lambda - 0,25)} \quad (5.3)$$

Analisi di confronto dati test misurati con dati test calcolati attraverso la (5.3).



Questa relazione ci da conferma comunque che con l'aumentare del fattore di allargamento si ha un conseguente aumento del rapporto tra Zmax e Zm.

Campo di validità: $\lambda > 1$; $2,5 < F_{d90} < 4,5$

5.4 Relazioni L_o, Z_{max}

Altro parametro interessante ai fini della progettazione di un bacino di dissipazione in massi posto a valle di una rampa in pietrame è la lunghezza del bacino stesso.

Tradizionalmente la lunghezza della vasca di dissipazione, ovvero della zona di alveo da proteggere, destinata al contenimento del risalto idraulico alla base del manufatto viene stimata con la seguente formula:

$$L \cong 5 \cdot (h_2 - h_1)$$

Dove h_1 e h_2 rappresentano rispettivamente l'altezza di monte del risalto idraulico e l'altezza coniugata di valle.

Tuttavia si deve tener di conto del fatto che la formula suddetta a rigore vale solo nel caso di risalto idraulico su fondo fisso, mentre il risalto che si forma su un fondo erodibile rappresenta un fenomeno fisico ben più complesso.

Per questo motivo acquista una certa rilevanza indagare come varia la lunghezza del tratto di alveo interessato dal fenomeno erosivo da parte del getto liquido in uscita dalla rampa, tratto che dovrà essere opportunamente protetto.

Nelle prove sperimentali eseguite, una volta raggiunte le condizioni di equilibrio, il profilo longitudinale della fossa di erosione è stato tracciato attraverso la misura di sezioni distanti al massimo 5 cm, in modo da poter individuare, oltre che il profilo di massimo scavo, anche un profilo medio, visto che in molti casi lo scavo non poteva essere considerato bidimensionale.

In particolare facendo riferimento a questo paragrafo studieremo il comportamento della lunghezza dello scavo mediante la variabile adimensionale $Lo = l_o / h_1$ (figura 5.2.1).

Dove la lunghezza dello scavo, $l_o = x_a - x_o$, rappresenta la distanza dal piede della rampa al punto x_a , dove il profilo di scavo raggiunge nuovamente il livello originario del fondo.

Esamineremo tale variabile in funzione della massima profondità di scavo, mediante la variabile Z_{\max} di cui conosciamo già i legami con F_{d90} .

Una volta ricavate le relazioni intercorrenti tra L_o e Z_{\max} saremo in grado di fornire, note le caratteristiche granulometriche del materiale costituente il fondo (d_{50}, d_{90}, σ), la pendenza (i) la portata defluente ed il fattore di allargamento (λ), tutte le informazioni sulle dimensioni fondamentali del profilo di scavo come riportato in figura 6.2.1.

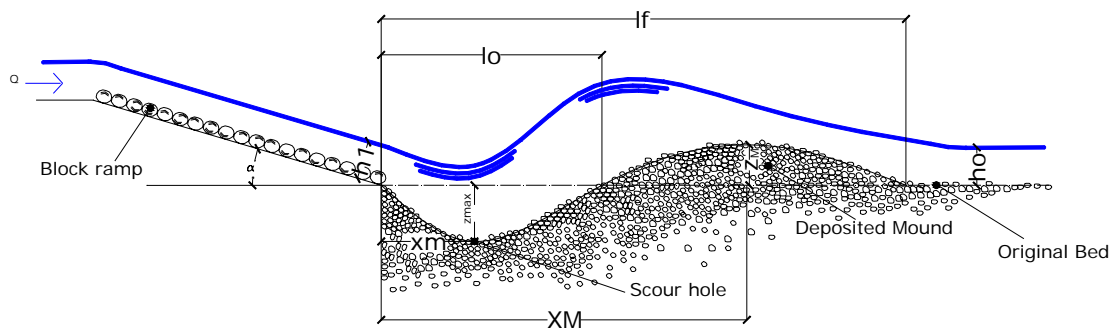


Fig 5.4.1 Definition sketch.

Pertanto, scegliendo un campione di dati ritenuto significativo, sono stati riportati, per i tre fattori di allargamento indagati, i valori della grandezza Z_{\max} .

In modo del tutto analogo a quanto fatto per i dati relativi alla profondità di scavo, è stata ricercata la curva che meglio interpolasse i punti sperimentali per ogni campione significativo scelto.

Si è verificato che i dati relativi alla lunghezza dello scavo possono essere interpolati con una relazione del tipo:

$$Lo = f_1(\lambda) \cdot Z_{\max}^{f_2(\lambda)} \quad (5.4)$$

Dove le funzioni f_1 e f_2 sono funzioni dell'angolo d'incidenza del getto sul fondo in funzione dell'allargamento.

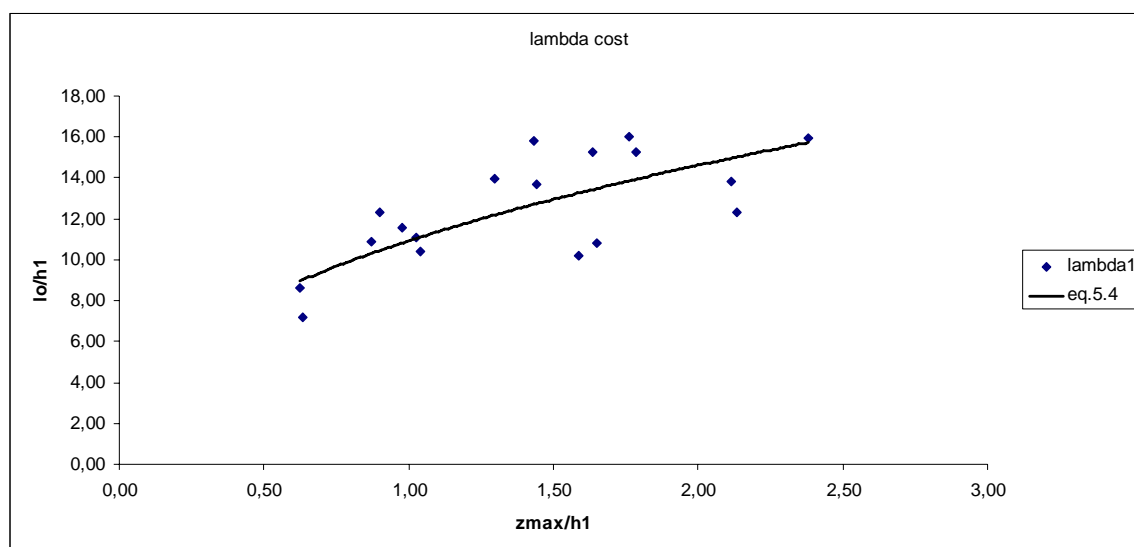


Fig 5.4.1 test per $i=0,125$; $i=0,167$; $i=0,250$

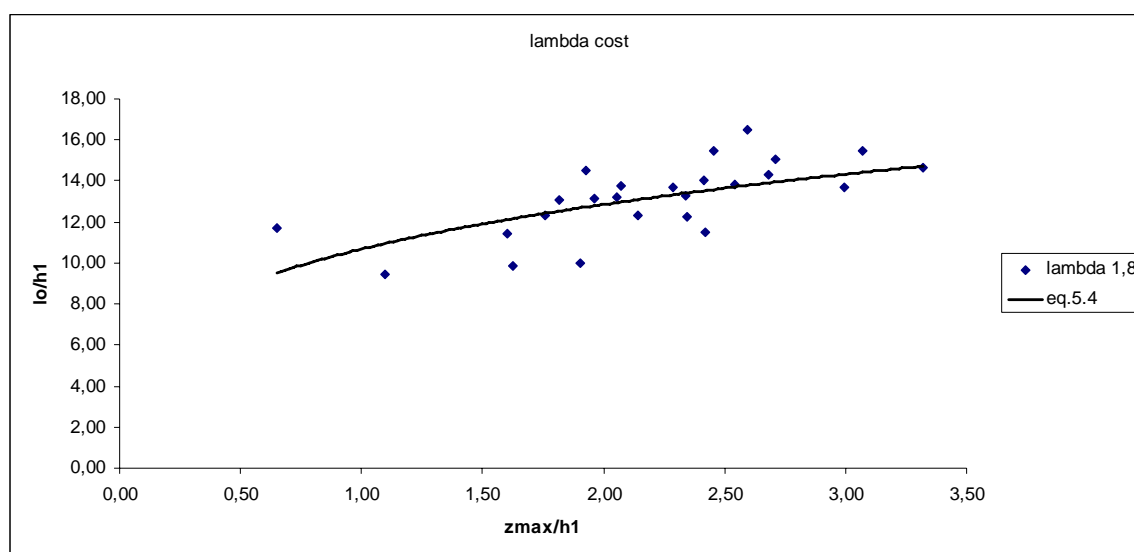


Fig 5.4.2 test per $i=0,125; i=0,167; i=0,250$

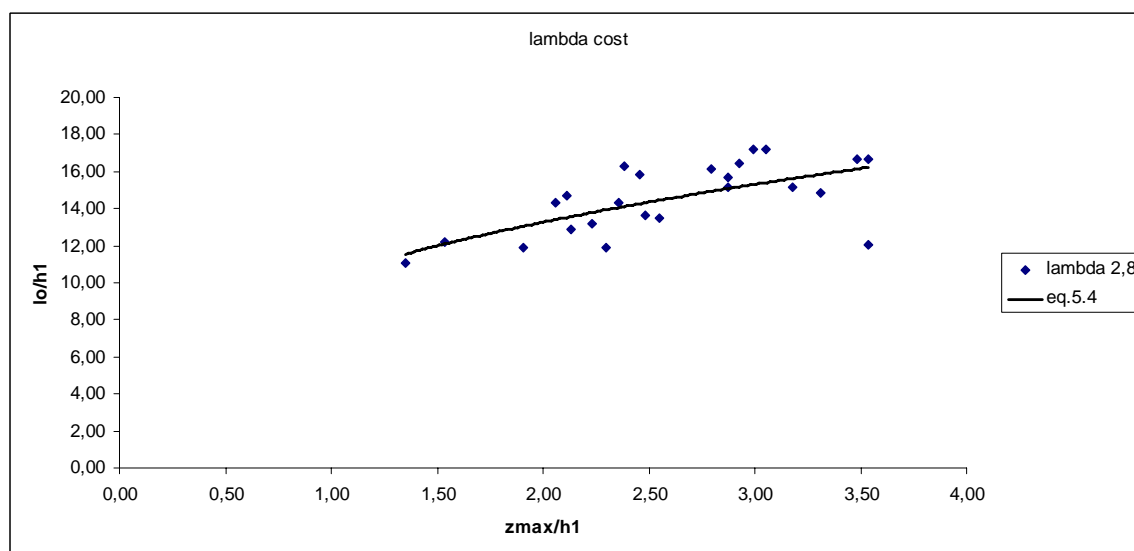


Fig 5.4.3 test per $i=0,125; i=0,167; i=0,250$

I grafici precedenti mettono in evidenza, un trend simile dei dati per ogni fattore di allargamento del bacino a valle della rampa, con valori della lunghezza di scavo che, a parità di fattore λ , aumentano all'aumentare della profondità massima.

Nel caso dei tre fattori di allargamento indagati, i coefficienti della curva interpolante sono risultati i seguenti:

$\lambda=1$	$A_1=10,922$	$B_1=0,42$
$\lambda=1,8$	$A_1=10,679$	$B_1=0,2675$
$\lambda=2,8$	$A_1=10,388$	$B_1=0,3528$

Riportando in forma grafica i valori dei parametri relativi ai tre fattori di allargamento è possibile ricavare le funzioni f_1 e f_2 scritte in precedenza.

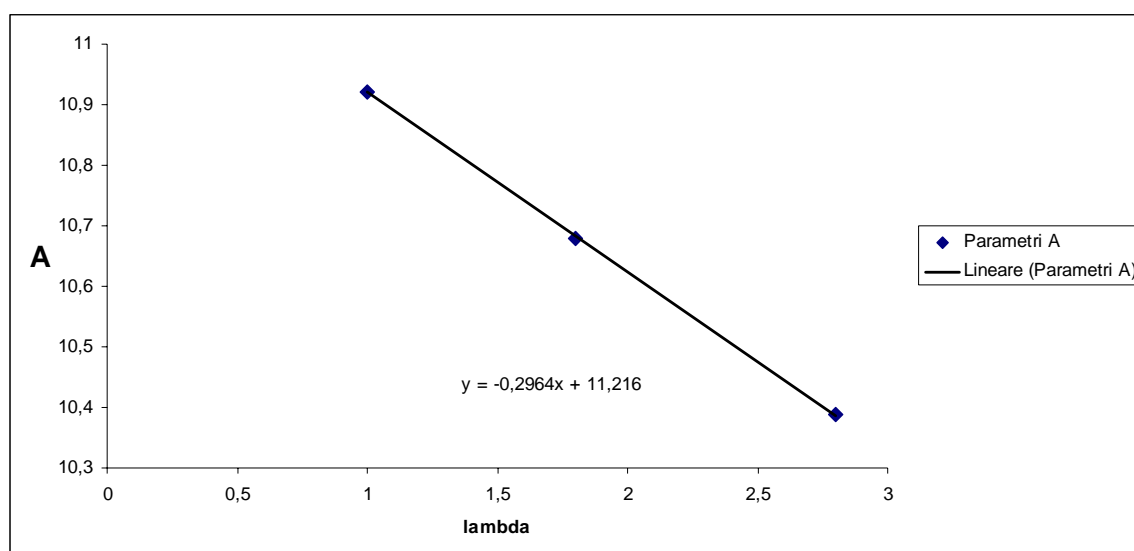


Fig 5.4.4 Parametro A in funzione del fattore di allargamento

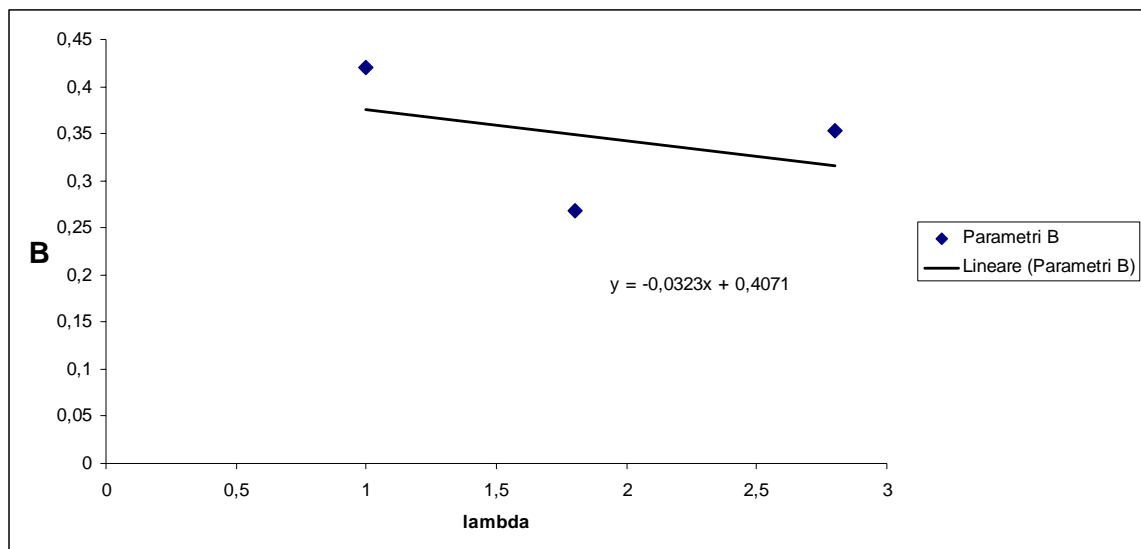


Fig 5.4.5 Parametro B in funzione del fattore di allargamento

I punti possono essere ben interpolati da una retta avente equazione

$$A = -0,296 \cdot \lambda + 11,2$$

Ed una avente equazione :

$$B = -0,03 \cdot \lambda + 0,41$$

Pertanto la versione definitiva della relazione 5.4 cercata risulta essere la seguente:

$$Lo = (-0,3 \cdot \lambda + 11,2) \cdot Z_{\max}^{(-0,03 \cdot \lambda + 0,41)}$$

Il campo di validità dell'equazione è definito da :

- $1 < \lambda < 2,8$ dove λ è il fattore di allargamento
- $1 < Z_{\max} < 4$ dove $Z_{\max} = z_{\max}/h_1$
- Condizioni di moto caratterizzati dalla formazione di deposito a valle dello scavo

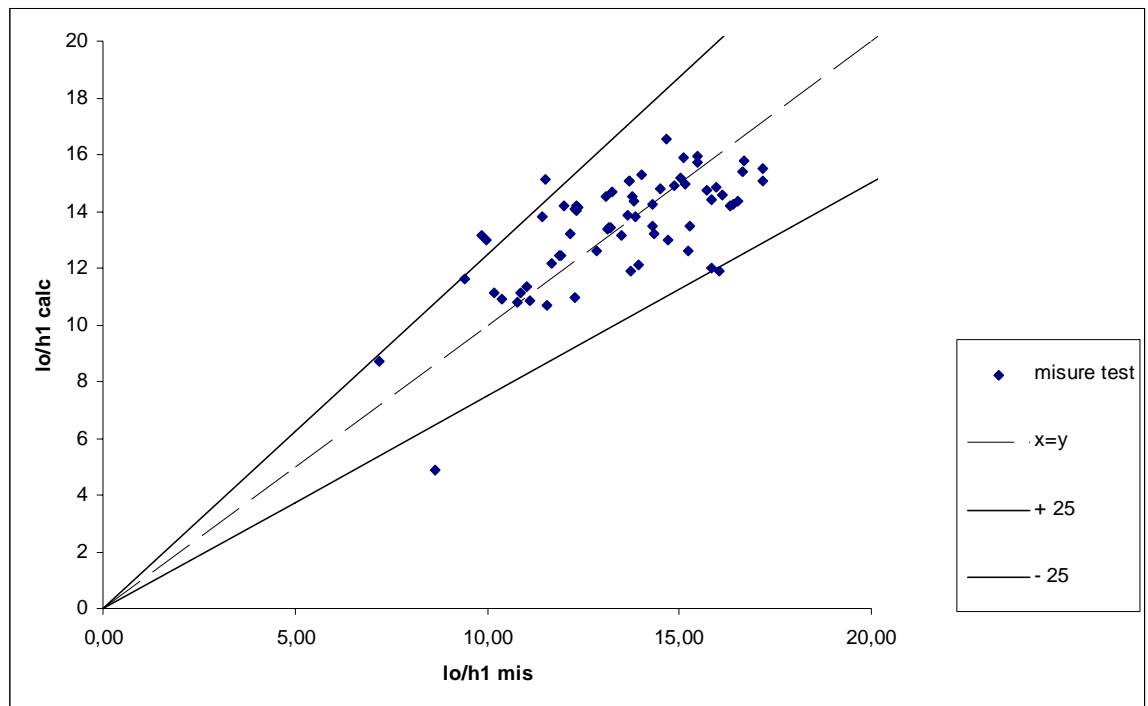


Fig 5.4.6 Confronto fra i valori misurati e calcolati mediante la 5.4

Utilizzando la relazione trovata si sono tracciate le curve rappresentanti la lunghezza dello scavo relativa ai tre fattori di allargamento di cui disponevamo dei dati.

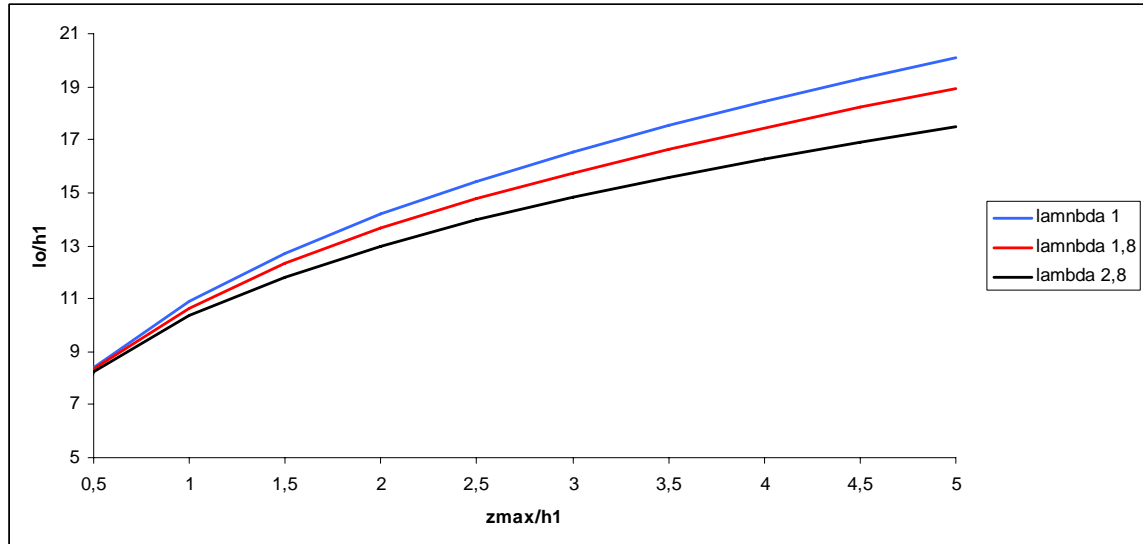


Fig 6.2.3 Confronto fra i λ attraverso l'equazione 5.4

Il grafico mette in evidenza che, a parità di profondità di scavo, i getti liquidi che impattano sul letto mobile danno luogo a fosse di scavo di minore lunghezza all'aumentare dell'allargamento.

Questa tendenza può essere spiegata dal fatto che nel caso di fattori di allargamento maggiori la vena liquida in uscita dalla rampa tende ad essere deviata in profondità ovvero come abbiamo già visto in precedenza lo scavo aumenta con l'aumentare del fattore di allargamento, a discapito della energia lungo l'asse longitudinale.

5.5 Relazioni Z_M , Z_{max}

Passiamo adesso all'esame delle altezze di riporto, che andiamo a studiare mediante la variabile adimensionale $Z_M = z_M/h_1$ dove z_M è la massima altezza di deposito del profilo di scavo medio in centimetri mentre h_1 è il tirante idrico in corrispondenza della fine della rampa. E' stato possibile controllare l'altezza h_0 di moto uniforme agendo manualmente sulla paratoia posta alla fine del canale che ci permetteva di regolare il deflusso a valle. Poter regolare tale paratoia a fatto sì che in tutte le prove vi fossero condizioni di deposito a valle dello scavo ovvero la formazione della duna evitando così situazioni in cui la eccessiva velocità della corrente potesse mettere in movimento tutto il materiale posto in circolazione dal getto in uscita dalla rampa, ovvero ci siamo messi in condizioni di non trasporto. La funzione ricavata per studiare l'andamento di z_M è caratterizzata dall'andamento della variabile adimensionale $Z_{max} = z_{max}/h_1$ che rappresenta il rapporto tra il valore massimo di scavo nella sezione di massimo scavo ed il tirante idrico in uscita dalla rampa come precedentemente definito.

Il grafico di seguito riportato rappresenta in tratto continuo la funzione da noi determinata, mentre i punti sono i valori misurati nei test di laboratorio per tutte le configurazioni di allargamento.

L'equazione è del tipo :

$$Z_M = 0,27 \cdot e^{Z_{max} \cdot 0,52} \quad (5.5)$$

La cui rappresentazione grafica è riportata in figura 6.5.1. insieme a tutti i valori misurati nei test.

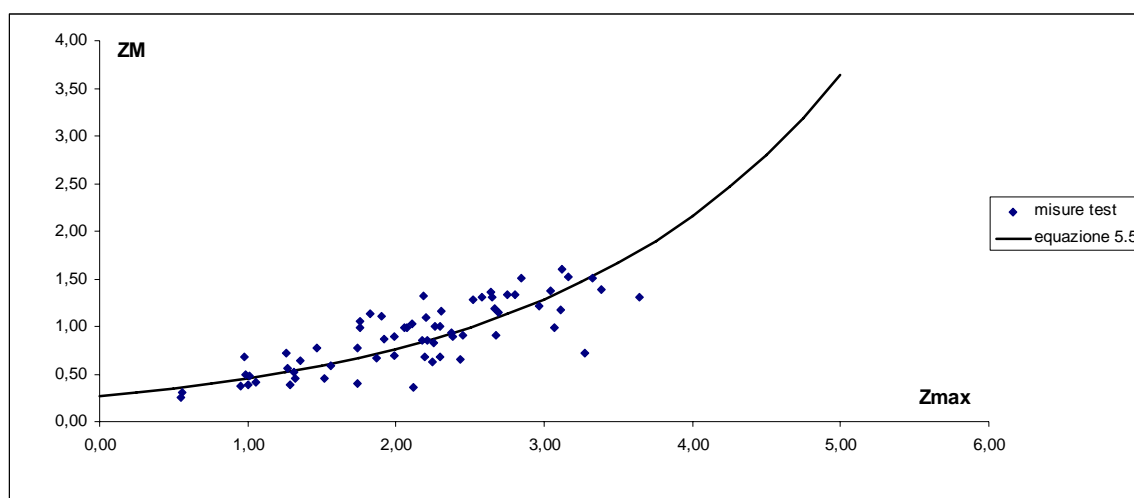


Fig 5.5.1 Andamento dei test per le tre pendenze indagate

Nel diagramma riportato nel seguito vengono posti a confronto tutti i valori di Z_M calcolati attraverso la formula soprascritta nelle tre condizioni di larghezza del bacino di dissipazione a valle della rampa ovvero $\lambda=1$, $\lambda=1,8$ $\lambda=2,8$ e nelle tre pendenze indagate $i=0,125$, $i=0,167$ $i=0,255$ con i valori di Z_M misurati nei test di laboratorio.

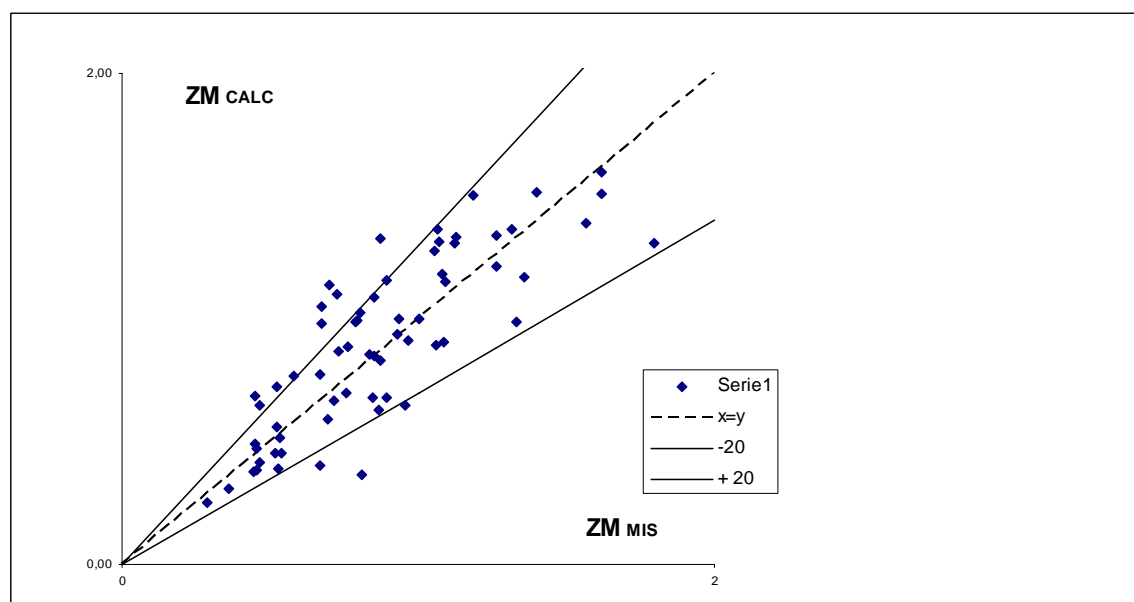


Fig 5.5.2 Confronto altezze massime duna misurate-calcolate con eq.5.5

5.6 Relazioni Z_M/Z_{MM}

Sono state molte le iterazioni provate attraverso i dati in nostro possesso ottenuti dalle prove di laboratorio al fine di determinare una relazione tra la forma di duna a valle dello scavo e le grandezze misurate, ma non riuscendo a determinare una funzione o un trend ben definito ci limitiamo ad esporre graficamente degli schemi che possono essere facilmente interpretati, introducendo una nuova variabile Z_{MM} definita come l'altezza media della duna.

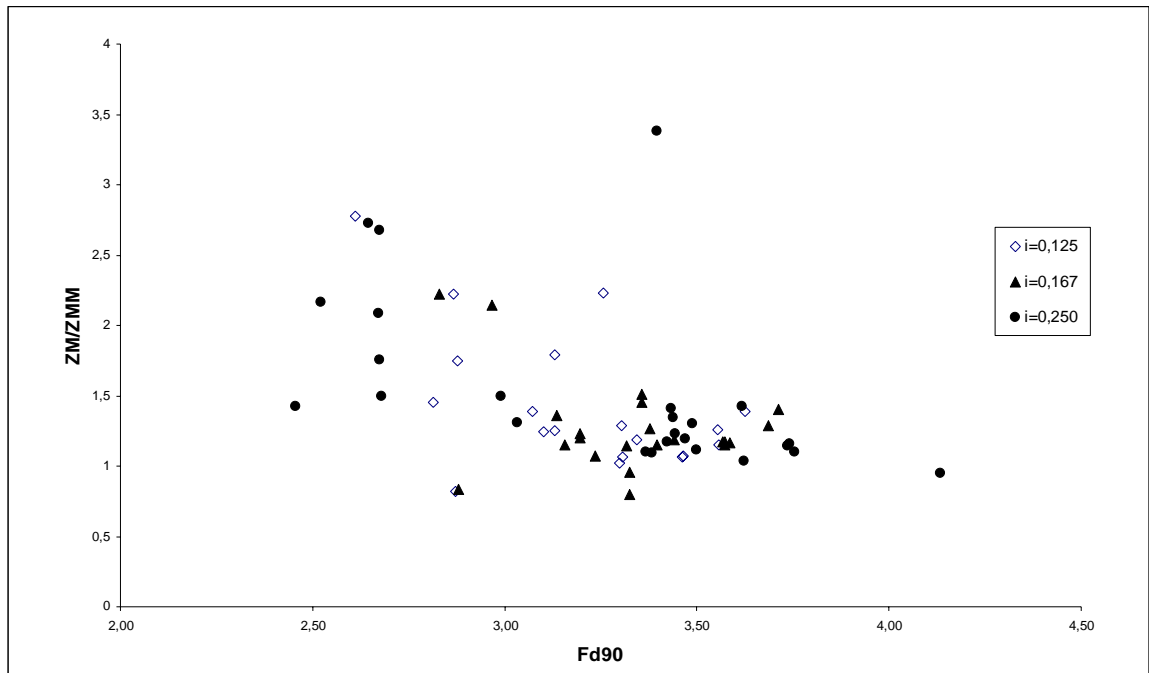


Fig 5.6.1 Relazione altezze medie/altezze massime di duna in funzione di $Fd90$ al variare della pendenza “ i ”

Analizzando il grafico di figura 6.6.3 non si possono ricavare informazioni particolarmente utili se non un valore qualitativo del rapporto tra l'altezza massima di scavo sull'altezza massima di duna che risulta essere mediamente pari 1,3.

Osservando il nuovo grafico (fig.6.6.4), mettendo in relazione gli stessi rapporti Z_M/Z_{MM} , ma questa volta in funzione della pendenza come avevamo fatto per i rapporti di scavo, si nota che, in questo caso, vi è una sostanziale indifferenza di trend; cosa che non accadeva per gli scavi.

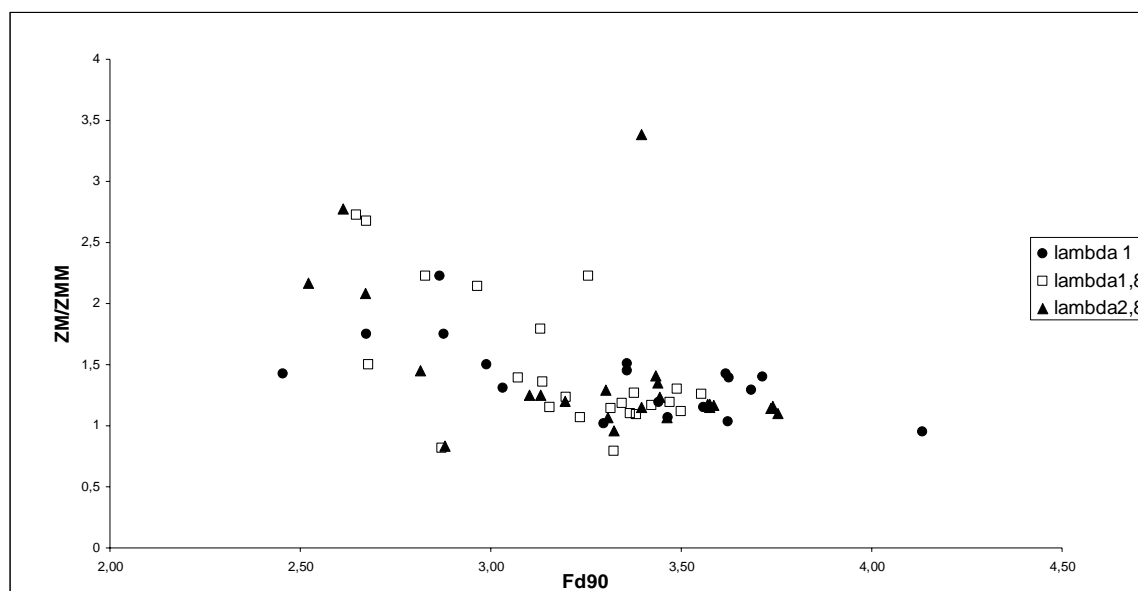


Fig 5.6.4 Relazione altezze medie/altezze massime di duna in funzione di $Fd90$ al variare di λ

Questo risultato ci può far concludere che la duna è molto protetta dallo scavo in quanto non cambia comportamento sia al variare della pendenza che al variare del fattore di allargamento λ .

5.7. Analisi profili di scavo longitudinali

In questo paragrafo ci proponiamo di esaminare il completo sviluppo dei profili delle escavazioni in funzione delle numerose variabili da cui esso dipende.

Le variabili adimensionalizzate utilizzate sono $X=x/l_0$ e $Z=z/z_m$ il cui significato è schematizzato nella seguente figura:

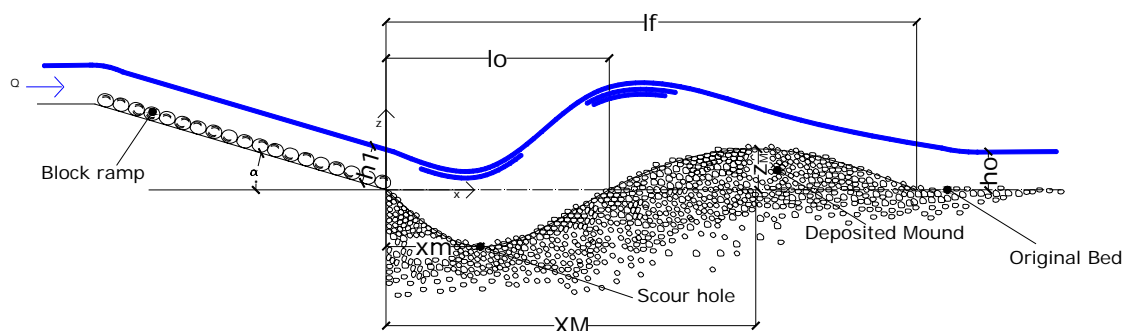


Fig 5.7.1 Definition sketch.

5.7.1 Andamento dello scavo $Z(x)$

In riferimento alle variabili sopradescritte la forma generale degli scavi può essere espressa da un'unica curva interpolante, passante per i punti di coordinate (0,0) e (1,0) di equazione:

$$Z = -2,45 \cdot X^3 + 7,59 \cdot X^2 - 5,13 \cdot X \quad (5.7.1)$$

Per la quale la sezione di massimo scavo è posizionata per 0,42Lo.

Come rappresentata nel grafico di figura 7.1.1 dove sono riportati tutti i valori delle prove adimensionalizzati nelle variabili X e Z sopradescritte in funzione della pendenza $i=1:8$, $i=1:6$, $i=1:4$ e del fattore di allargamento λ pari a $\lambda = 1$, $\lambda = 1,8$, $\lambda = 2,8$.

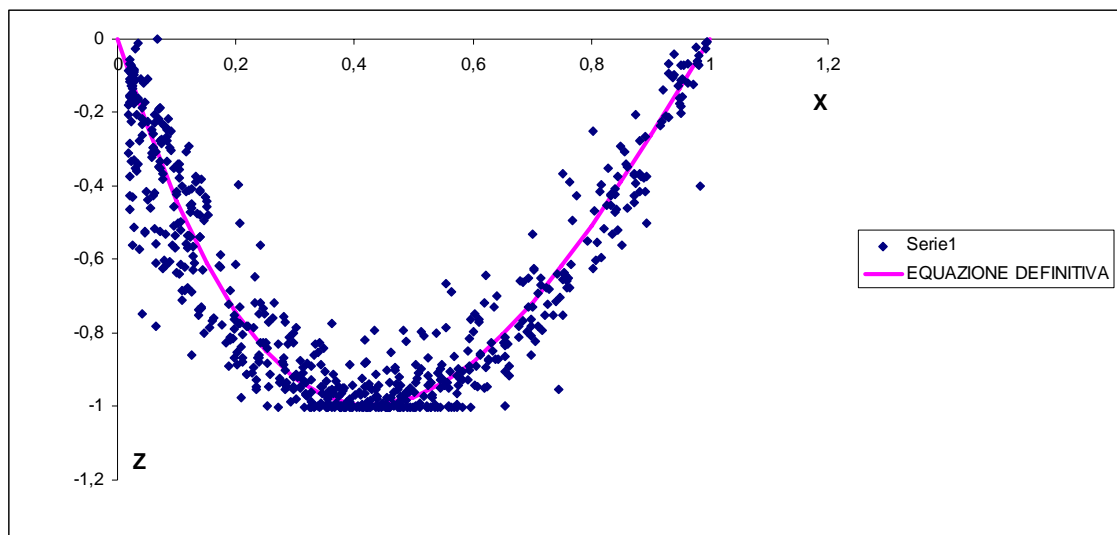


Fig 6.7.1.1 Profilo di scavo adimensionalizzato per $\sigma=1,2$

Da un confronto con altri autori che hanno determinato l'andamento degli scavi a valle di una rampa in pietrame per materiali omogenei ovvero con $\sigma=1,2$, si nota un lieve allontanamento della sezione di massimo scavo rispetto alla rampa.

L'effetto dell'allargamento genera come risultato, oltre ad un maggiore approfondimento dello scavo, anche ad un sensibile aumento della distanza della sezione di massimo scavo dal piede della rampa.

Si è inoltre analizzato graficamente l'andamento medio dei profili longitudinali fissando la pendenza e facendo variare il solo fattore di allargamento λ , si nota in maniera esaustiva che l'effetto dell'allargamento provoca un notevole aumento dello scavo ed un sensibile incremento delle dimensioni della duna come riportato nelle seguenti figure.

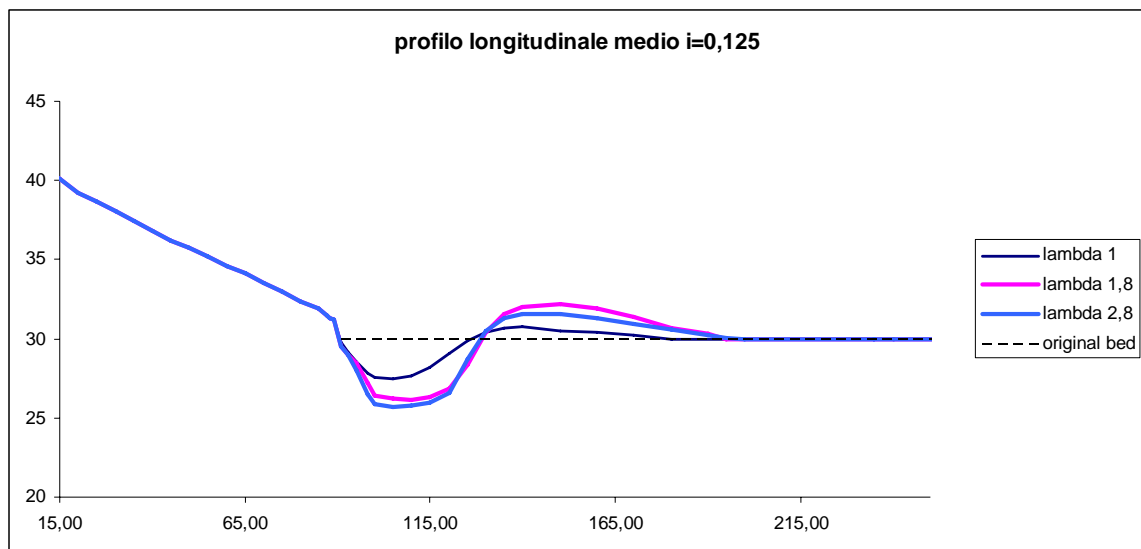


Fig 6.7.1.2 Profilo longitudinale di scavo per $\sigma=1,2$ $i=0,125$

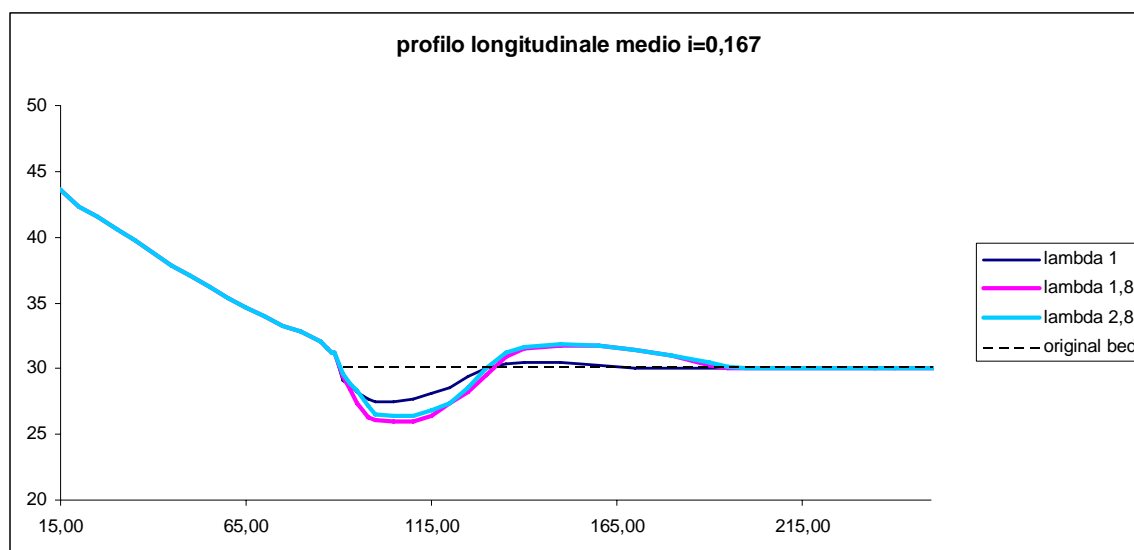


Fig 6.7.1.3 Profilo longitudinale di scavo per $\sigma=1,2$ $i=0,167$

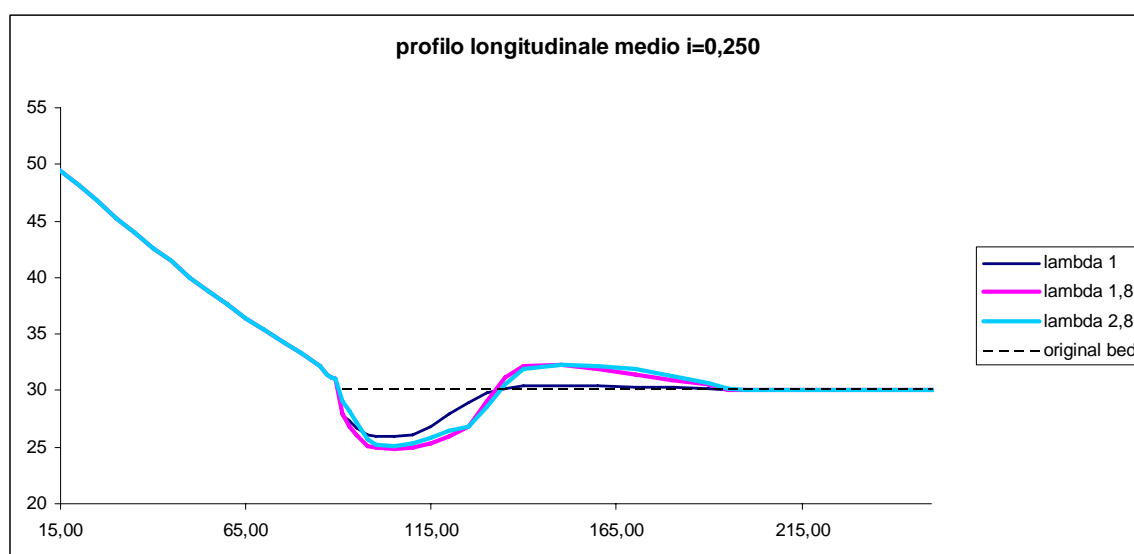


Fig 6.7.1.4 Profilo longitudinale di scavo per $\sigma=1,2$ $i=0,250$

5.7.2 Calcolo dei volumi di scavo

In questo paragrafo abbiamo idealizzato un volume teorico come un prisma di base B (larghezza del canale), l_o (distanza dal piede della rampa all'ascissa di quota di transizione scavo-riporto) ed altezza z_{\max} (altezza massima di scavo) misurato come da schema seguente al fine di trovare una relazione che ci potesse dare il valore dei volumi che si vanno a spostare in funzione dell'allargamento del bacino di dissipazione.

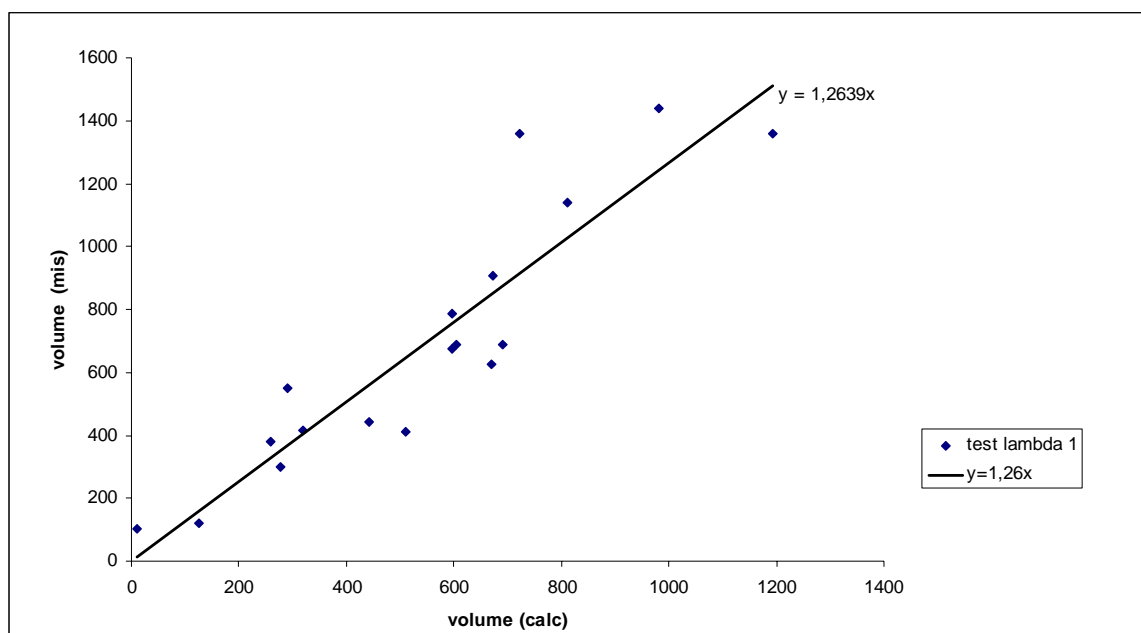


Fig 5.7.2.1 Equazione con intercetta $y=0$ per $\lambda=1$

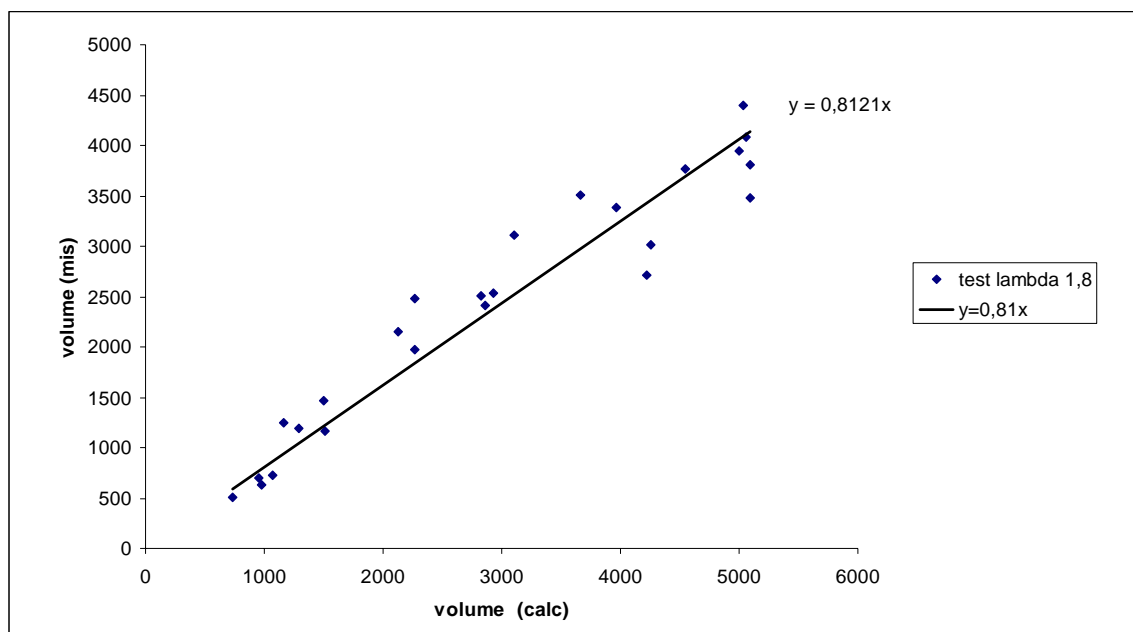


Fig 5.7.2.2 Equazione con intercetta $y=0$ per $\lambda=1,8$

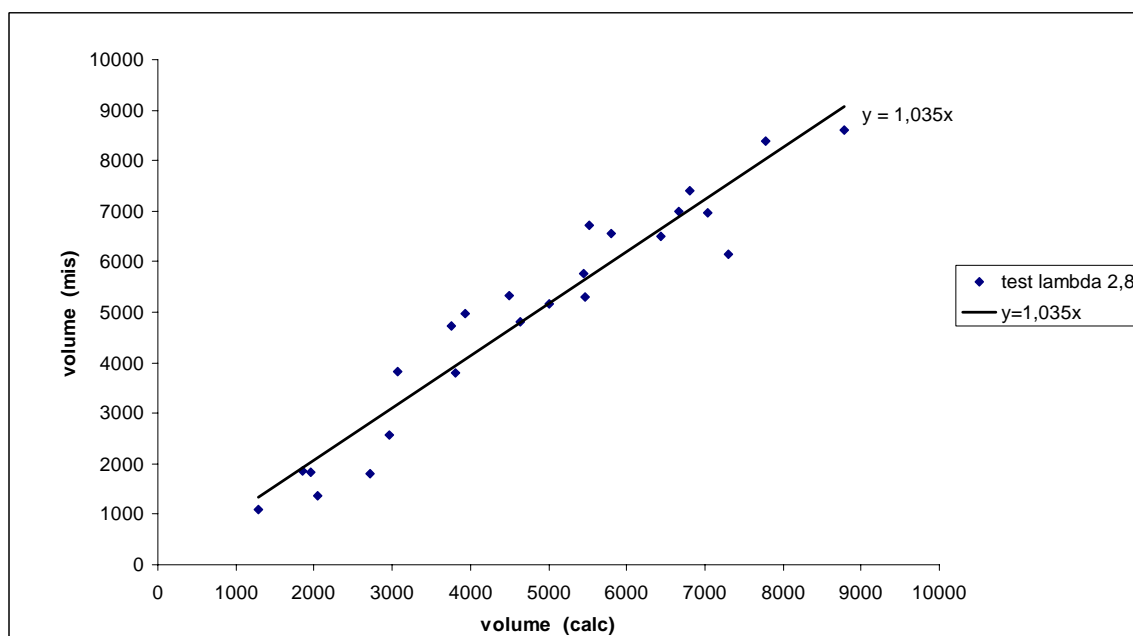


Fig 5.7.2.3 Equazione con intercetta $y=0$ per $\lambda=2,8$

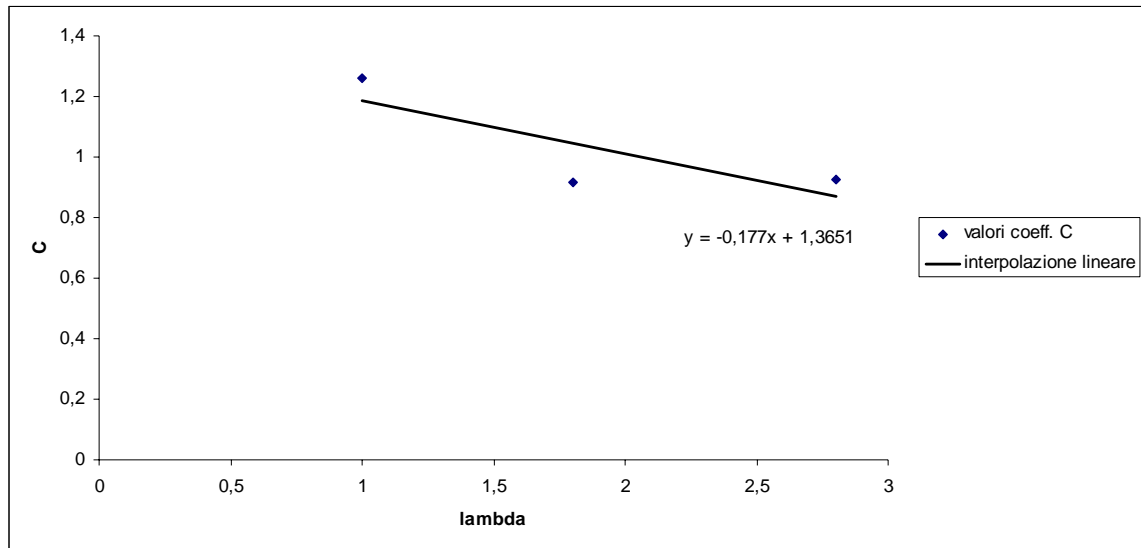


Fig 5. 7.2.4 Equazione parametro C in funzione di λ

Come evidenziato dai grafici abbiamo confrontato i valori del volume calcolati attraverso i valori ottenuti dalle nostre elaborazioni precedenti nel modo seguente:

$$V_{cal} = \left[\frac{(l_o)_{calc} \cdot (z \max)_{calc}}{2} \right] \cdot B$$

mentre i valori misurati sono ovviamente del tipo:

$$V_{mis} = \left[\frac{(l_o)_{mis} \cdot (z \max)_{mis}}{2} \right] \cdot B$$

La correzione è avvenuta attraverso la ricerca del parametro C in funzione del fattore di allargamento λ ottenendo una relazione del tipo:

$$V_s = V_{calc} \cdot (-0,28 \cdot \lambda + 1,15) \quad (5.7.2)$$

La cui attendibilità si è messa in evidenza nel grafico di fig. 6.7.2.5

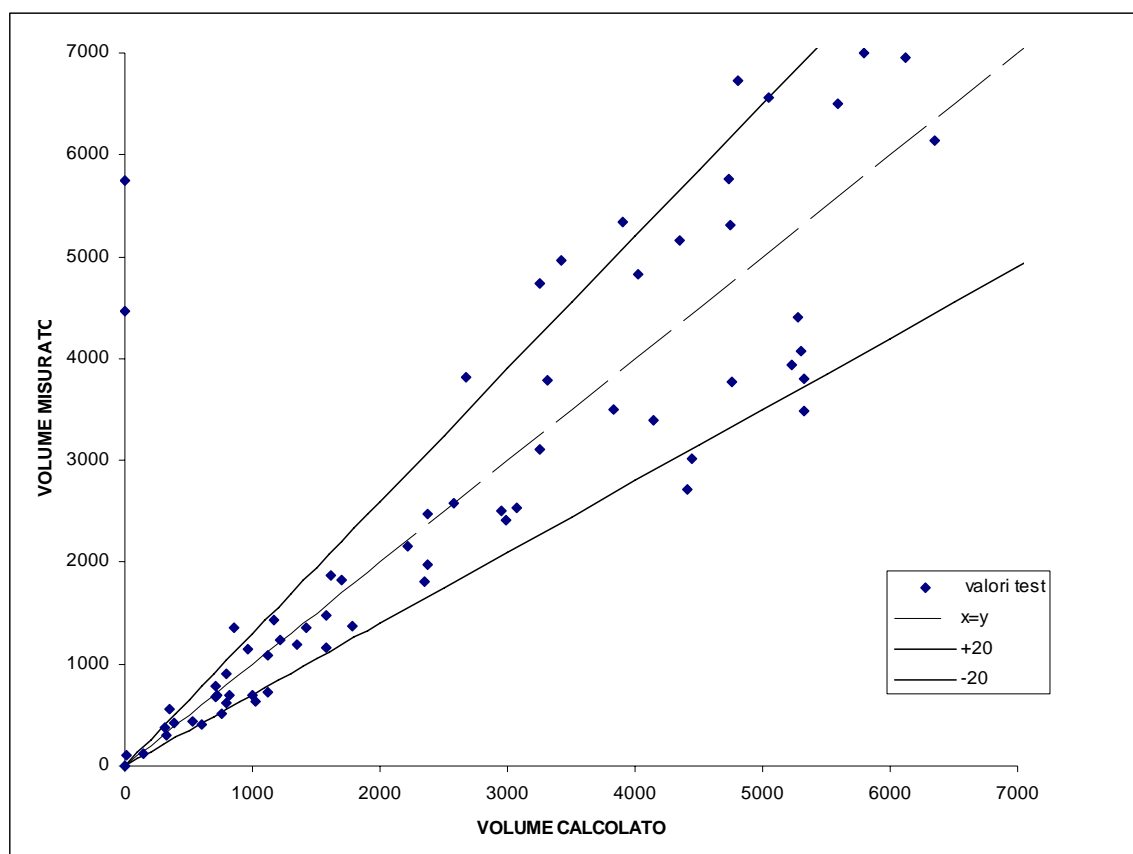


Fig 5.7.2.5 Confronto valori misurati con valori calcolati con eq.5.7.2

5.8. Analisi sezioni di massimo scavo

5.8.1 Misura angolo attrito interno

In questo paragrafo ci proponiamo di esaminare qualitativamente il fenomeno dello scavo attraverso l'analisi della sezione trasversale di massimo scavo in funzione dell'allargamento a valle della rampa in pietrame.

Il fenomeno che tentiamo di inquadrare attraverso la sezione trasversale, quindi bidimensionale, nella realtà è un fenomeno che si sviluppa tridimensionalmente per cui è di notevole difficoltà trovare le relazioni di controllo anche qualitative del fenomeno.

Si inizia nel determinare l'angolo di natural declivio o di attrito interno del materiale costituente il fondo mobile sia in condizioni asciutte che bagnate ricavando come valori l'angolo $\alpha=35^\circ$ e $\beta=31^\circ$.

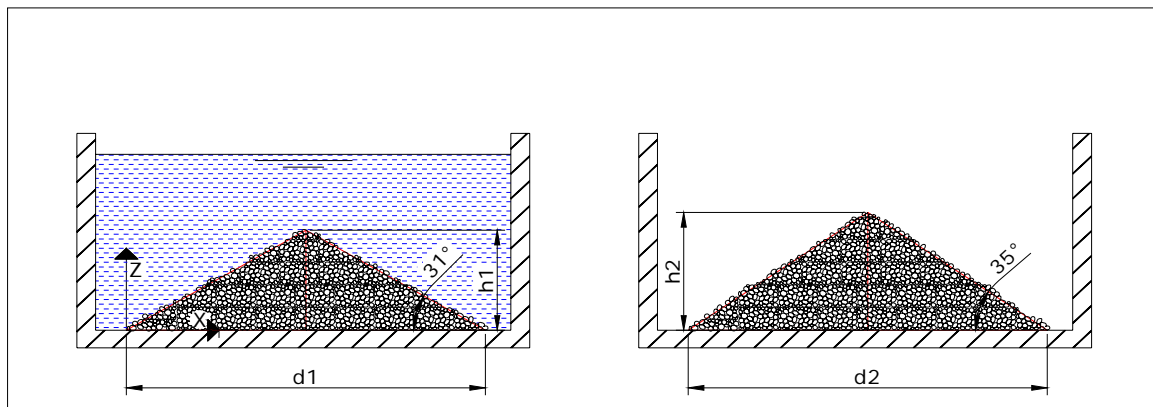


Fig 5.8.1.1 Angoli d'attrito materiale fondo mobile $\sigma=1,2$

I valori si sono ottenuti versando del materiale pari ad un volume di 2 litri a terra ed andando successivamente a misurare il diametro d_1 e l'altezza massima del cono raggiunta h_1 , in condizioni di stabilità, del materiale in condizioni bagnate come

riportato nel grafico seguenti . Si è proceduto in maniera analoga ma in condizioni asciutte misurando h_2 e d_2 che determinano il valore di $\alpha=35^\circ$.

In riferimento ai valori degli angoli sopradescritte si è ricavato l'equazione della retta che rappresenta la pendenza dell'angolo d'attrito del nostro materiale.

$$z = -0,57 \cdot x + 30$$

Dove z rappresenta la quota del punto mentre x rappresenta il valore della ascissa che si sviluppa ortogonale all'asse longitudinale del canale.

5.8.2 Andamento della sezione di massimo scavo funzione di λ

L'andamento della sezione risente di molti fattori, ma noi abbiamo osservato con attenzione le seguenti grandezze :

$\lambda=B/b$ fattore di allargamento dato dal rapporto tra la larghezza del bacino di dissipazione e la larghezza della rampa in pietrame;

$$F_{d_{90}} = \frac{v}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g\right) \cdot d_{90}}}$$

Introducendo nei grafici i valori misurati delle quote z nelle sezioni di massimo scavo si nota che vi è un certo andamento al variare del fattore λ di allargamento. Si sono raggruppati i grafici in funzione della pendenza $i=1:8$, $i=1:6$, $i=1:4$ e del fattore di allargamento λ pari a $\lambda =1$, $\lambda =1,8$ $\lambda =2,8$.

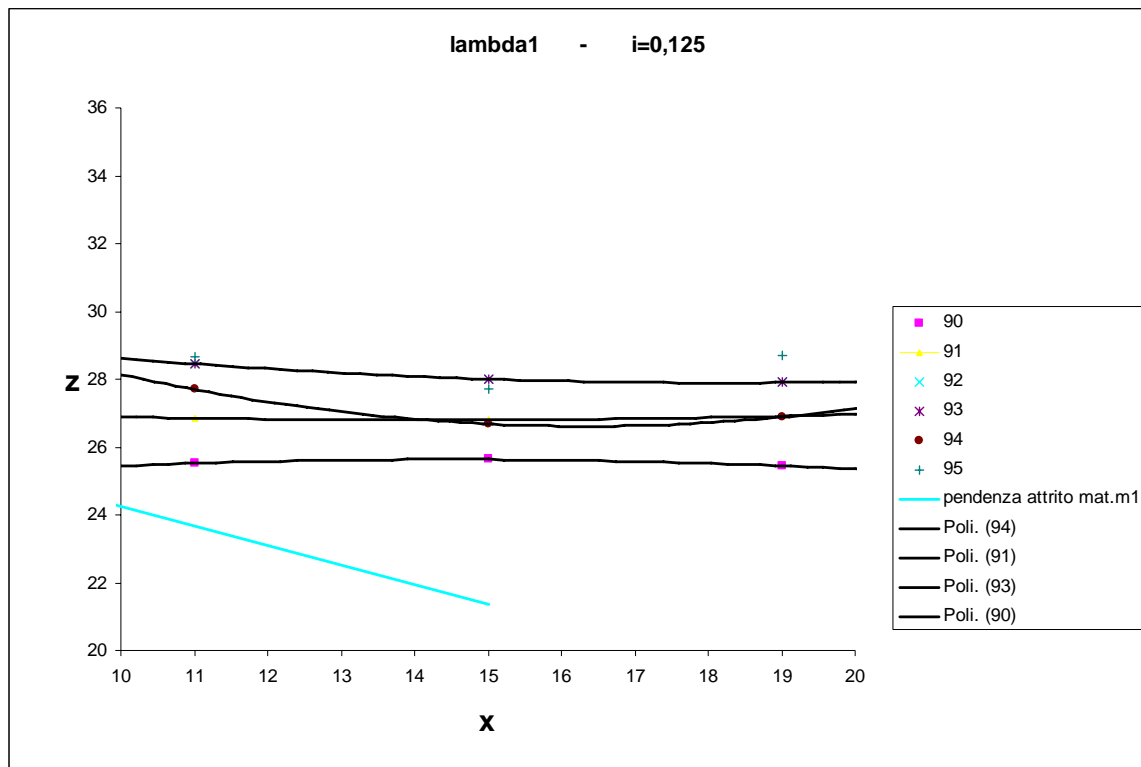
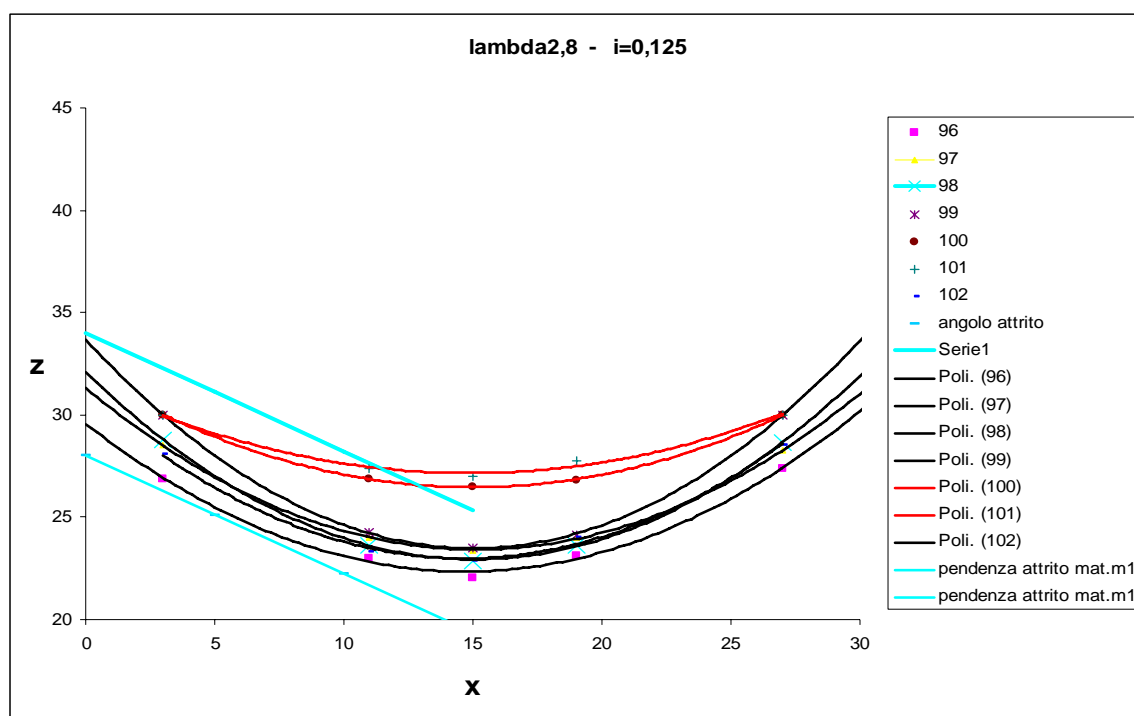
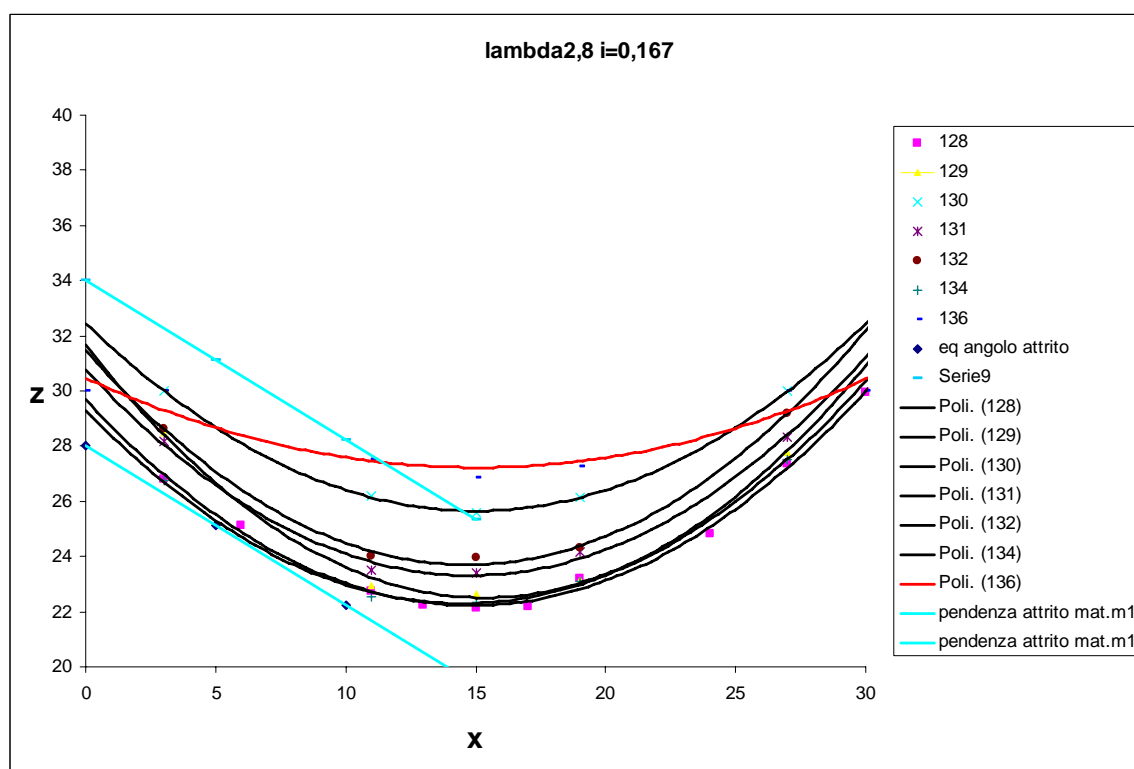


Fig 5.8.2.1 Andamento sezioni massimo scavo con materiale fondo mobile $\sigma=1,2$

Nella condizione $\lambda=1$ si nota che per i valori di F_{d90} investigati nel range del F_{mb} che vanno dal valore 2,87 a 3,7 il materiale mobile nella sezione di massimo scavo ha un andamento pressoché parallelo al fondo del canale ovvero sembra indifferente alle variazioni del F_{d90} .

Nelle condizioni di allargamento $\lambda=2,8$ e per le varie pendenze si notano due tendenze diverse di scavo per valori di $F_{d90}<3$ (colore rosso) o $F_{d90}>3$ (colore nero). I primi tendono ad avere andamento orizzontale parallelo al fondo del canale, i secondi tendono ad essere paralleli alla retta rappresentante l'angolo interno (colore ciano) del materiale mobile.

Fig 5.8.2.2 Andamento sezioni massimo scavo con materiale fondo mobile $\sigma=1,2$ Fig5.8.2.3 Andamento sezioni massimo scavo con materiale fondo mobile $\sigma=1,2$

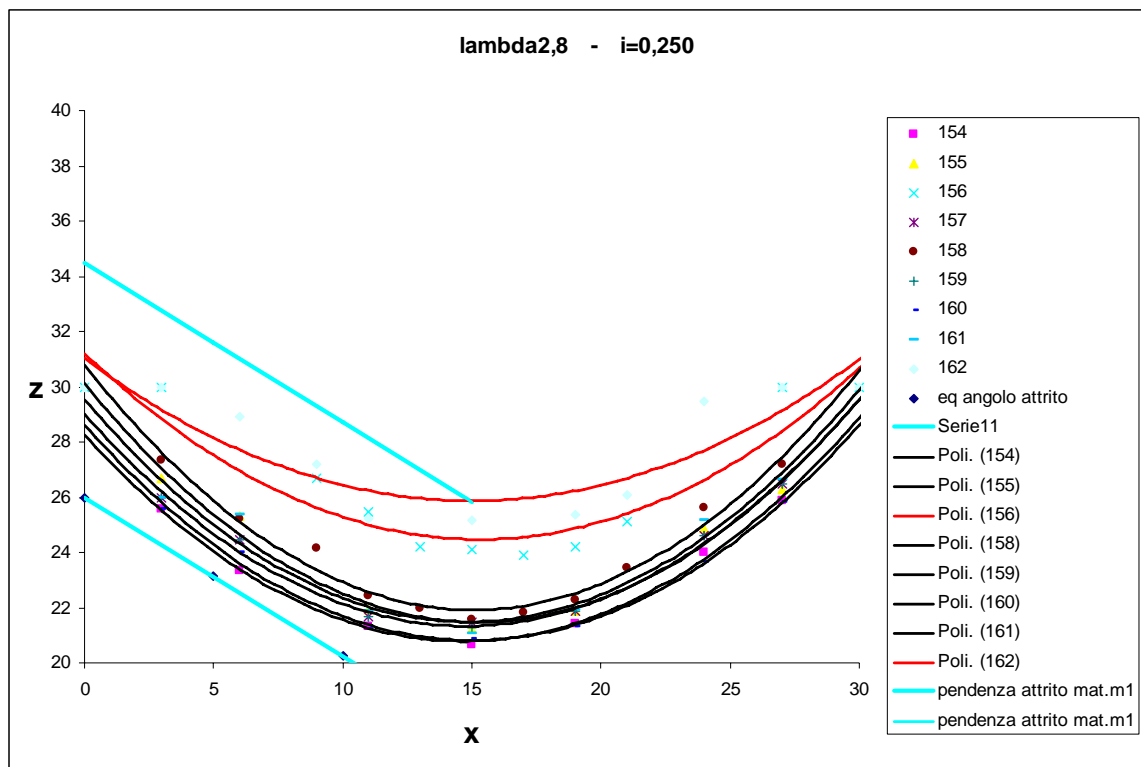
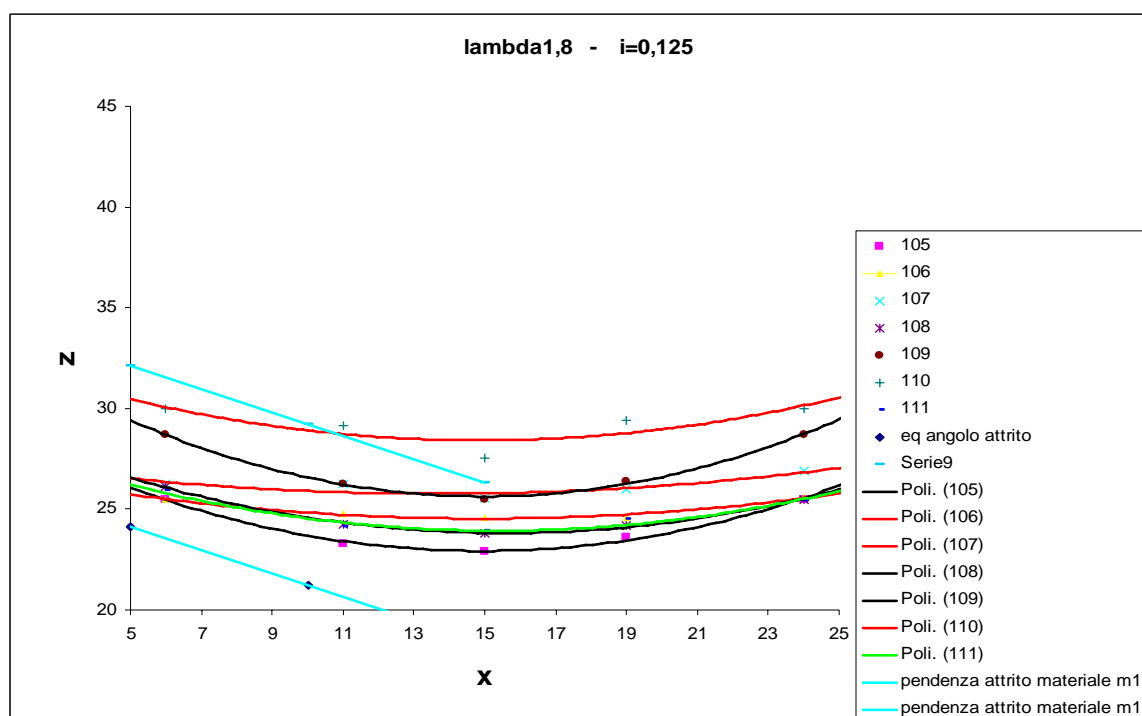
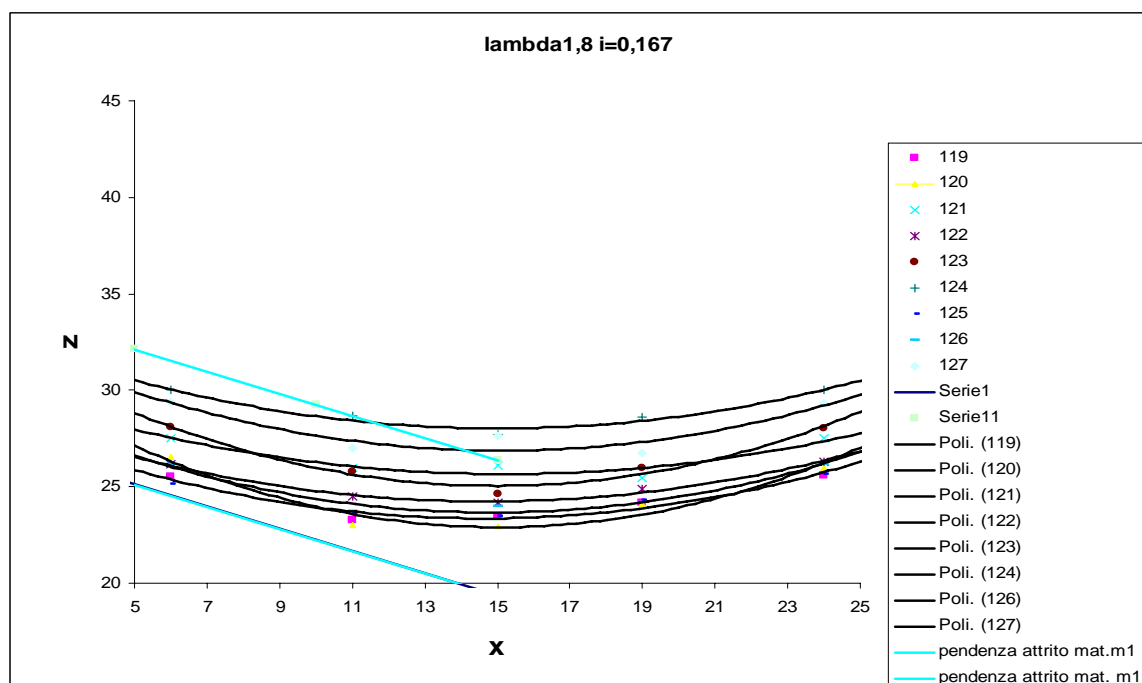


Fig 5.8.2.4 Andamento sezioni massimo scavo con materiale fondo mobile $\sigma=1,2$

L'effetto dell'allargamento genera come risultato, oltre ad un maggiore approfondimento dello scavo, rispetto alla condizione con fattore di allargamento $\lambda=1$, una diversa forma infatti la cosa interessante è che con l'allargamento le curve interpolanti a tratto continuo nero hanno un andamento pressoché parallelo alla retta individuata dall'angolo d'attrito interno, ovvero tendono a disporsi anche trasversalmente secondo la retta di massima pendenza possibile. Questo fatto non è più vero per valori di $F_{d90} < 3$ come evidenziato dalle rette a tratto continuo in colore rosso.

I risultati ottenuti per il fattore di allargamento pari a $\lambda=1,8$ sembrano essere intermedi e non danno dei risultati molto soddisfacenti.

Fig 5.8.2.5 Andamento sezioni massimo scavo con materiale fondo mobile $\sigma=1,2$ Fig5.8.2.6 Andamento sezioni massimo scavo con materiale fondo mobile $\sigma=1,2$

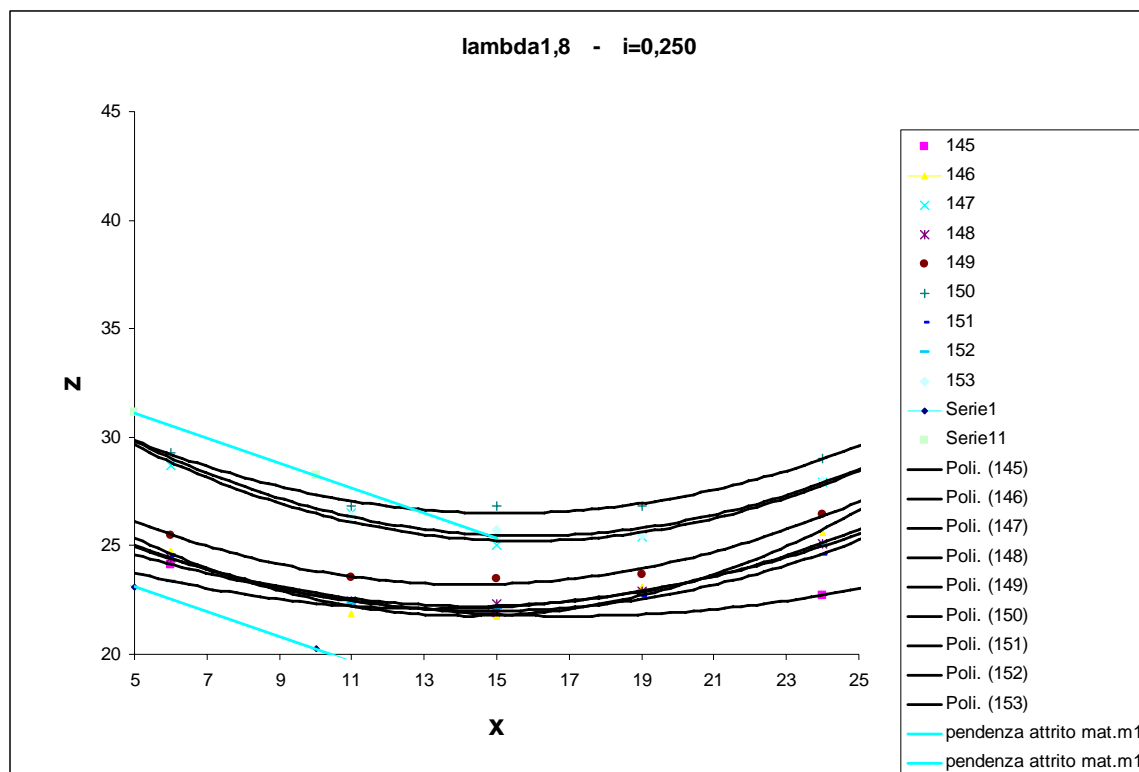


Fig 5.8.2.7 Andamento sezioni massimo scavo con materiale fondo mobile $\sigma=1,2$

Si nota comunque una tendenza di appiattimento della sezione fenomeno che abbiamo visto essere tipico dello scavo per la condizione di fattore di allargamento $\lambda=1$.

5.8.3 Analisi grafica della sezione di massimo scavo

In questo paragrafo ci proponiamo di capire l'andamento qualitativo dello scavo visto come sezione ortogonale all'asse longitudinale del canale nel punto di massimo scavo, ovvero cerchiamo di visualizzare attraverso variabili adimensionali l'andamento della forma della sezione di massimo scavo.

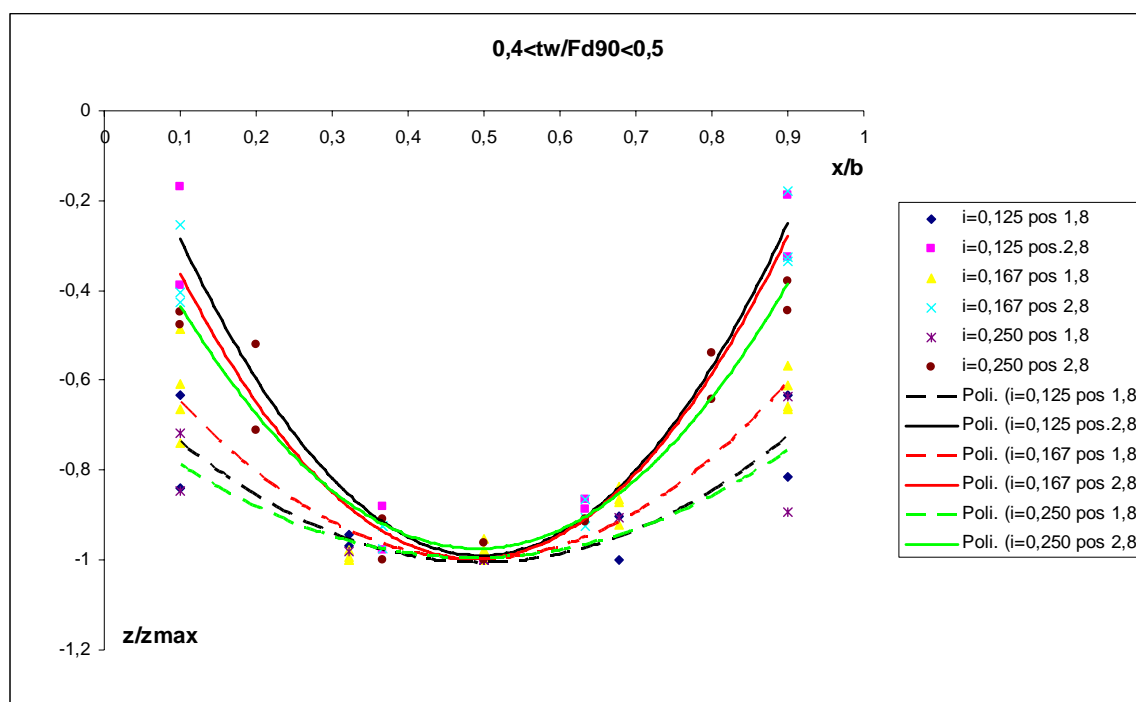
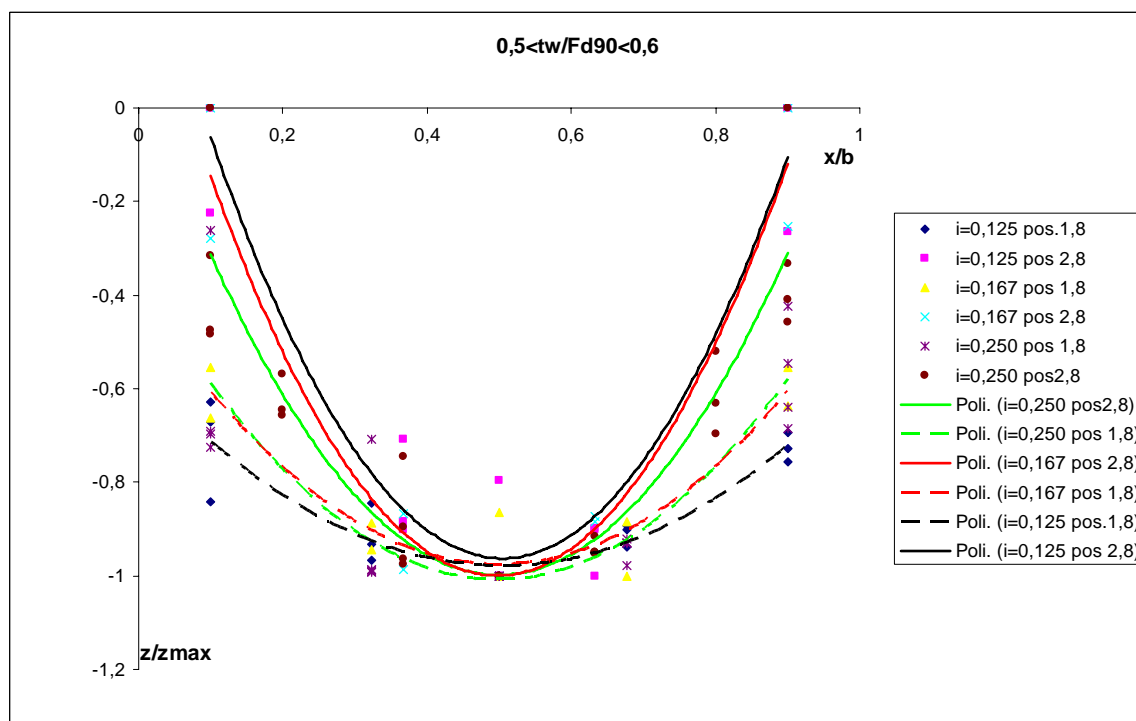
Tale andamento della sezione risente di molti fattori, ma noi abbiamo individuato come principali le seguenti grandezze :

$$Tw=h_0/h_1$$

$$F_{d_{90}} = \frac{v}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g\right) \cdot d_{90}}}$$

Introducendo il rapporto tra le grandezze sopradescritte ovvero $Tw/F_{d_{90}}$ abbiamo individuato una serie di range in cui si ripetevano gli andamenti delle sezioni al variare del fattore λ di allargamento.

I risultati sono riassunti nei seguenti grafici illustrativi dove abbiamo adimensionalizzato le ascisse x su b (larghezza del canale) e le quote z sulla quota di massimo scavo z_{max} .

Fig 5.8.3.1 Profilo di scavo adimensionalizzato per $\sigma=1,2$ Fig. 5.3.8.2 Profilo di scavo adimensionalizzato per $\sigma=1,2$

Da un'analisi grafica, si nota, osservando i profili che per ogni valore della pendenza indagato si ha un notevole irripidimento dello scavo ogniqualvolta si aumenta la larghezza del canale a valle della rampa come ben evidenziato dalla differenza di forma tra le curve a linea continua e a tratto spaziato che per ogni colore descrivono l'andamento per le diverse pendenze.

Questo risultato conforta il precedente, ovvero allargando il bacino di dissipazione a valle della rampa si genera oltre ad un aumento della profondità massima di scavo anche una tendenza del materiale a disporsi secondo il proprio angolo di attrito interno.

6. Confronto con alcune formule di letteratura

6.1 Premessa

In questo capitolo ci proponiamo di esaminare attraverso l'utilizzo di numerosi lavori disponibili in letteratura in cui si riportano i risultati di prove di laboratorio e studi teorici che hanno riguardato prevalentemente il processo di scavo determinato da una corrente a valle di traverse; tali studi sono stati orientati alla individuazione di relazioni che legano la massima profondità di scavo con l'altezza dell'opera trasversale, con le grandezze idrodinamiche della corrente e con le caratteristiche del materiale di fondo dell'alveo.

Numerose sono le formule ricavate da prove di laboratorio che evidenziano gli effetti dei diversi parametri sul processo erosivo.

Generalmente tali espressioni hanno una struttura del tipo:

$$D = K \cdot \frac{q^x \cdot H^y}{d^z}$$

legano la profondità D dello scavo con il dislivello H tra il pelo libero a monte e a valle del salto, con la portata q per unità di larghezza e il materiale d caratteristico del materiale d'alveo. Le diverse formule si distinguono generalmente per i diversi diametri caratteristici considerati e per i valori proposti per le costanti K, x, y, z .

6.2 Confronti Altri Autori

In questo paragrafo viene proposto un confronto tra la relazione sperimentale ricavata nel presente studio per la valutazione della massima profondità di scavo in funzione dell'allargamento del bacino di dissipazione a valle della rampa in pietrame e alcune formule di letteratura che stimano l'escavazione prodotta da un getto libero su un letto di materiale incoerente, esprimendo le variabili che compaiono nelle formule in unità metriche, dove non è indicato diversamente.

In particolare sono state considerate le formule indicate qui di seguito.

Veronese (1937)

$$D_s + Y_t = 4,12 \cdot \frac{Q^{0,422}}{d_m^{0,66}}$$

Lo studio condotto dall'autore è relativo al caso di un getto orizzontale in uscita da un canale orizzontale e che si immette in un bacino disponendosi radente al fondo mobile.

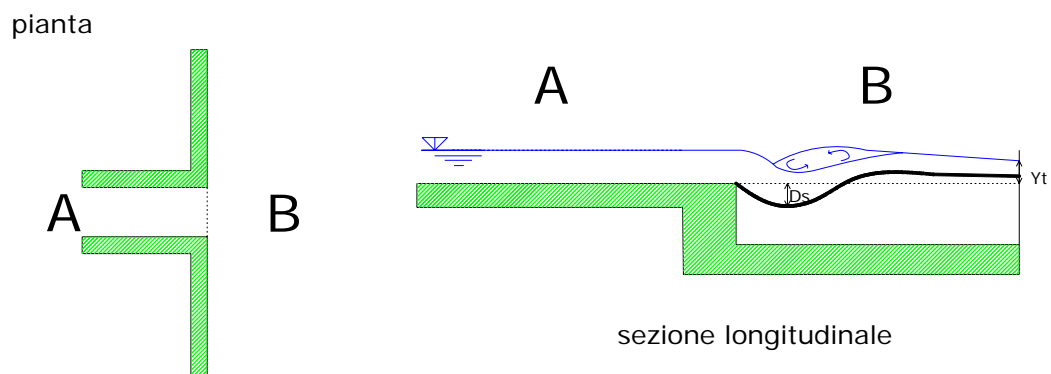


Fig 6.2.1 Definition sketch.

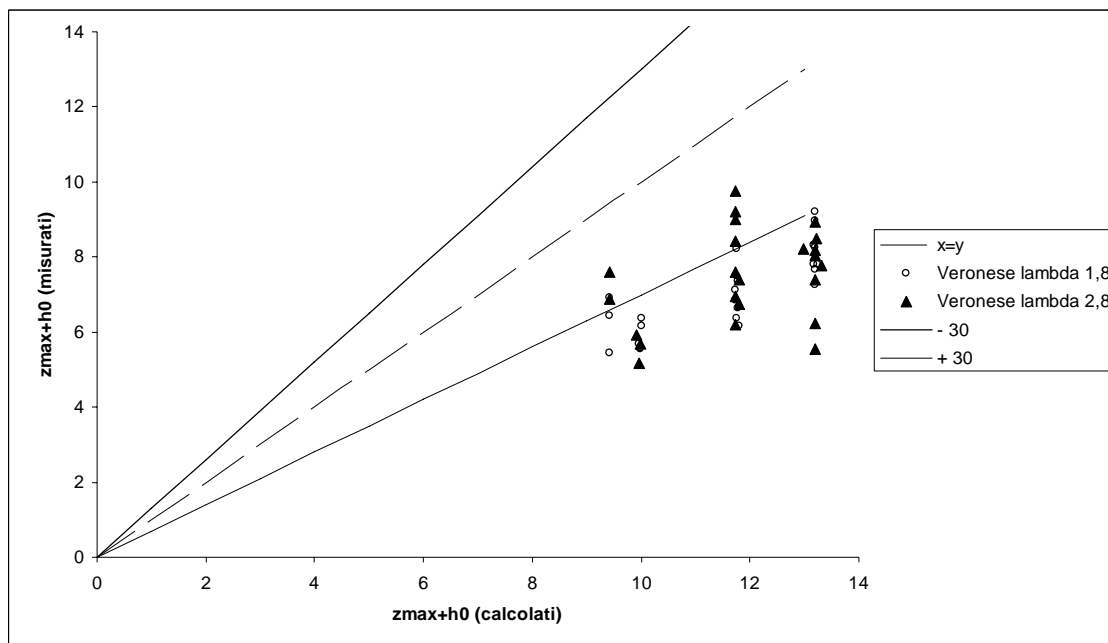


Fig 6.2.2 Confronto dati misurati – calcolati con la formula di Veronese

Anche con l'utilizzo dell'equazione di Veronese si ha una sovrastima dei dati calcolati rispetto a quelli misurati, ma si nota che i valori misurati tendono ad avvicinarsi a quelli calcolati per fattori di allargamento maggiori. Questo fatto ci conforta in quanto Veronese ha studiato, anche se sul piano orizzontale, lo scavo all'interno di bacini di dissipazione a larghezza indefinita.

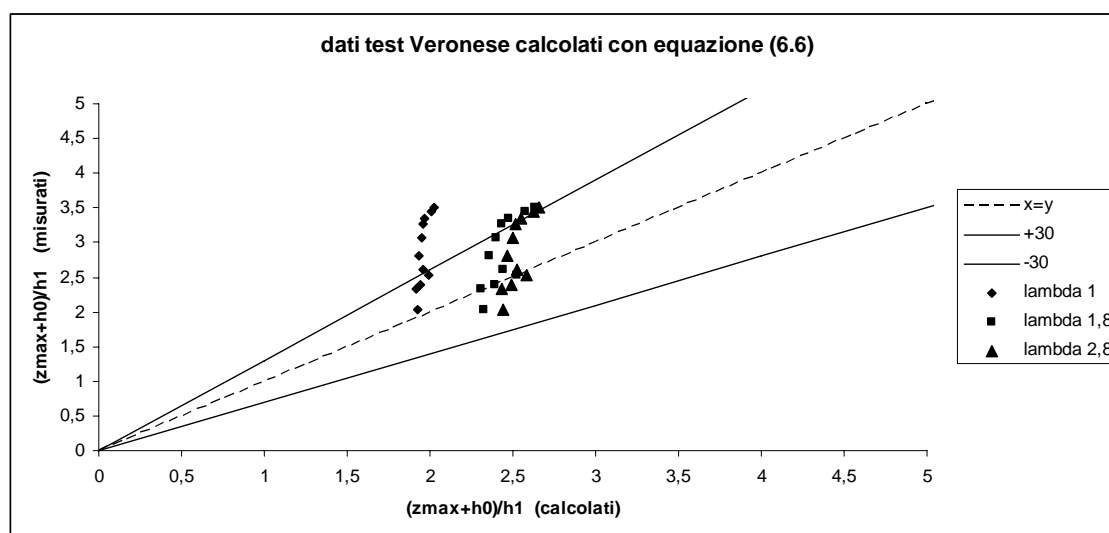


Fig 6.2.3 Confronto dati misurati test Veronese – calcolati con la formula 5.6

Dal confronto attraverso la figura 6.2.3 si nota che la formula da noi trovata relativa ad un fattore di allargamento $\lambda=2,8$ ben interpola gli scavi massimi ricavati dai test effettuati da Veronese, questo risultato è plausibile in quanto si è dimostrata l'influenza della pendenza nei confronti dello scavo cosa che nei test di Veronese non è considerato infatti i suoi esperimenti hanno pendenza nulla. Altro fattore di notevole importanza è la coerenza della nostra equazione che si avvicina sempre più alla retta $x=y$ incrementando il fattore di allargamento λ .

Bormann and Julien (1991)

$$D_s + D_p = K \cdot q^{0,6} \cdot \frac{U}{g^{0,8} d_s^{0,4}} \cdot \sin \beta$$

Lo studio condotto dai due autori è relativo al caso di una corrente che impatta sul fondo in uscita da un canale a livello più alto.

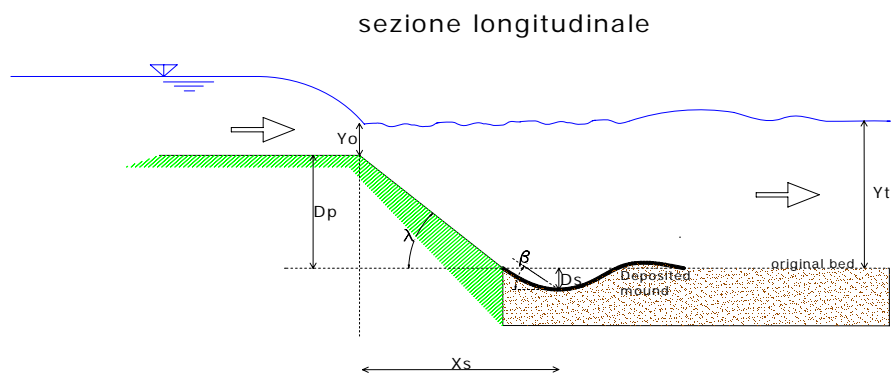


Fig 6.2.4 Definition sketch.

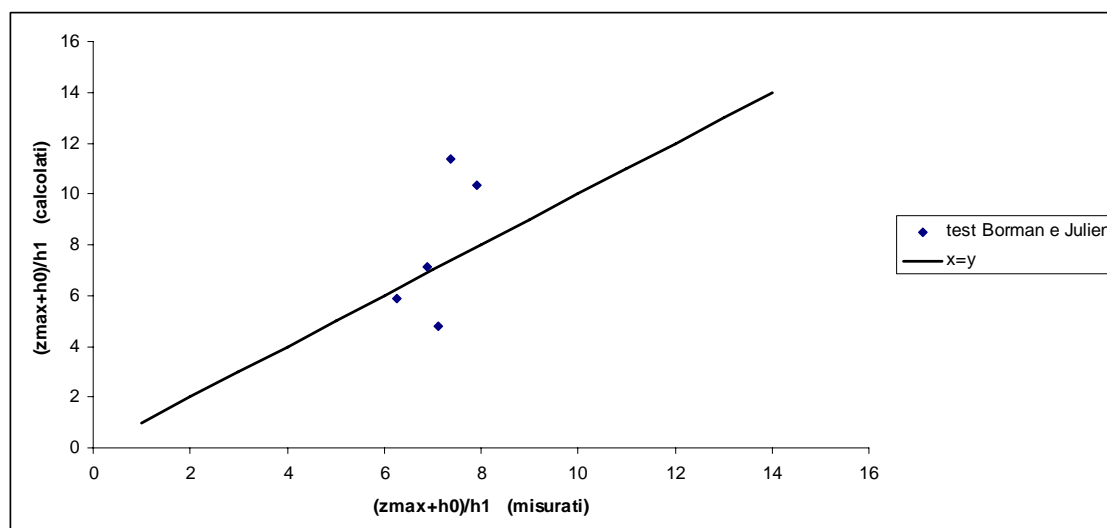


Fig 6.2.5 Confronto dati Bormann e Julien misurati – calcolati con la formula.6.6.

In figura 6.2.5 ,questa volta abbiamo confrontato i dati misurati nei test di Bormann e Julien che rientravano nei range di validità del nostro studio, con quelli calcolati con la formula da noi ricavata nel presente studio. Si nota che l'equazione da noi trovata bene calcola i valori di massimo scavo relativo all'esperienza di Bormann e Julien.

8. Conclusioni

Nella presente tesi è stato analizzato per via sperimentale l'effetto prodotto dalla corrente liquida, a valle di rampe in pietrame con la presenza di un bacino di dissipazione a fondo mobile di larghezza incrementata rispetto alla rampa di un fattore di allargamento da noi definito con la lettera greca λ dato dal rapporto tra la larghezza del bacino stesso e quella della rampa.

Il processo di escavazione che si verifica a valle delle rampe è stato studiato al fine di individuare:

1. I parametri principali che influenzano le caratteristiche geometriche dello scavo;
2. le condizioni idrauliche che possono influenzare la capacità di trasporto solido della corrente a valle della rampa in funzione dell'allargamento

Le rampe sono state realizzate con massi naturali, in quanto la pietra è vista come uno dei materiali fondamentali delle sistemazioni idrauliche a basso impatto ambientale, essendo capace di partecipare alla definizione del paesaggio in modo naturale.

I risultati ottenuti nel corso delle centinaia di prove effettuate hanno fornito esiti non sempre positivi dal punto di vista del risultato sperimentale cercato, ma comunque utili al fine del contributo allo studio della messa a punto di opere di difesa idraulica in materia naturale.

Per quanto riguarda il risalto idraulico, sono stati esaminati solo i casi in cui il fenomeno si localizza al piede della rampa o ad una certa distanza a valle di esso, in modo da poter ritenere che la direzione del getto impattante sul fondo mobile fosse quella data dall'inclinazione della rampa.

Dalle prove sperimentali effettuate è emerso che nel caso di materiale uniforme costituente il fondo mobile, il principale parametro che influenza la geometria dello scavo oltre il fattore di allargamento è il numero di Froude densimetrico F_d , il quale tiene conto della velocità media del getto in uscita dalla rampa, dell'accelerazione gravitazionale e del diametro caratteristico del materiale di fondo.

A parità di numero di Froude densimetrico, un altro parametro da cui dipende la profondità e la lunghezza dello scavo è l'angolo di inclinazione della rampa, che per quanto sopra descritto, rappresenta anche l'angolo di impatto del getto, a sua volta dipendente da fattore di allargamento del bacino a valle della rampa.

Sulla base delle esperienze di laboratorio ed in base a considerazioni dimensionali, sono state ricavate le relazioni funzionali che legano le variabili in gioco con i parametri adimensionali e che permettono di descrivere dal punto di vista matematico il fenomeno idraulico studiato.

Quindi sono state ricavate delle formule analitiche che in funzione della pendenza e dell'allargamento del manufatto consentono :

- il calcolo della profondità massima di scavo, relativa al fattore di allargamento alla pendenza e al Froude densimetrico
- il calcolo della lunghezza dello scavo, relativo al fattore di allargamento e della profondità massima di scavo
- il calcolo del rapporto tra Z_{max}/Z_m in funzione del Froude densimetrico
- il calcolo dell'altezza massima della duna a valle dello scavo in funzione della profondità massima di scavo
- determinazione della funzione di scavo longitudinale
- calcolo dei volumi di scavo in funzione del fattore di allargamento

Inoltre si sono eseguite le seguenti analisi grafico-analitiche

- analisi grafica della sezione di massimo scavo
- relazioni Z_M/Z_{MM}

In base ai risultati conseguiti nelle esperienze di laboratorio, è possibile fare le seguenti considerazioni:

1. per tutte le prove relative a differenti configurazioni di pendenza della rampa, la profondità di scavo aumenta all'aumentare del fattore di allargamento, tale incremento si verifica più rapidamente all'inizio del processo e successivamente in modo gradualmente più lento, fino al raggiungimento delle condizioni di equilibrio con tempi maggiori rispetto ai tempi delle configurazioni senza allargamento del bacino di dissipazione;
2. indipendentemente dalla pendenza della rampa, la lunghezza dello scavo, a parità di massimo scavo, diminuisce all'aumentare del fattore di allargamento;
3. l'allargamento ha notevole influenza sulla forma dello scavo in quanto col presente studio si dimostra che il rapporto tra Z_{\max} e Z_m aumenta con trend ben definito all'aumentare di λ ;
4. rappresentando le sezioni di massimo scavo in maniera adimensionale si nota la tendenza del materiale di fondo a disporsi secondo un angolo sempre più vicino a quello di attrito interno del materiale stesso con l'aumentare del fattore di allargamento;
5. l'altezza massima della duna aumenta sensibilmente all'aumentare dell'allargamento ;
6. la sezione di massimo scavo si allontana leggermente dal piede della rampa rispetto alle configurazioni prive di allargamento ovvero per $\lambda=1$;

Tutto quanto sopra esposto ci ha dato interessanti nuovi metodi di calcolo ma anche ha aperto la strada a nuovi percorsi di studio sugli allargamenti, che si sono dimostrati essere problematiche avvincenti e nel contempo molto difficili da misurare in ragione delle notevoli variabili. Sarà, infatti, sicuramente interessante proseguire lo studio con modelli di laboratorio a più ampia scala in modo da consentire la ricerca delle variazioni di scavo a sempre più elevati fattori di allargamento che potranno così convalidare definitivamente le relazioni trovate e definire i loro limiti.

Legenda

b= larghezza della rampa

B= larghezza del canale

$\lambda = B / b$

d_{16} =diametro corrispondente al 16% del passante in peso

d_{50} = diametro corrispondente al 50% del passante in peso

d_{84} = diametro corrispondente al 84% del passante in peso

d_{90} = diametro corrispondente al 90% del passante in peso

i=pendenza della rampa

$$F_{d_{50}} = \frac{v}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) \cdot g \cdot d_{50}}} \quad \text{Numero di Froude densimetrico } F_{d_{50}}$$

$$F_{d_{90}} = \frac{v}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) \cdot g \cdot d_{90}}} \quad \text{Numero di Froude densimetrico } F_{d_{90}}$$

h_1 =tirante idrico medio in uscita dalla rampa

L=lunghezza rampa (cm)

l_o =lunghezza di scavo del profilo medio (cm)

$L_o = l_o / h_1$

Q=portata defluente (l/s)

$T_w = h_o / h_1$

X_m =distanza della sezione di massimo scavo misurata orizzontalmente dal piede della rampa(cm)

X_M =distanza della sezione di massimo duna misurata orizzontalmente dal piede della rampa(cm)

z_m =profondità di scavo del profilo medio (cm)

$Z_m = z_m / h_1$

z_{max} = massima profondità di scavo del profilo nella sezione di massimo scavo (cm)

$Z_{max} = z_{max} / h_1$

$\sigma = \sqrt{d_{84} / d_{16}}$ coefficiente di non uniformità del materiale

Legenda Relazioni

Relazione (5.2)

$$\frac{z_{\max} + h_0}{h_1} = [A(\lambda) \cdot \text{Exp}(B(\lambda) \cdot Fd_{90})] \cdot f(i)$$

$$\frac{z_{\max} + h_0}{h_1} = [A(\lambda) \cdot \text{Exp}(B(\lambda) \cdot Fd_{90})] \cdot (2,1729 \cdot i + 0,7218)$$

$$\frac{z_{\max} + h_0}{h_1} = \left[(0,12 \cdot \lambda^2 - 0,21 \cdot \lambda + 2,5) \cdot e^{(-0,059 \cdot \lambda^2 + 0,24 \cdot \lambda - 0,14) \cdot Fd_{90}} \right] \cdot (2,17 \cdot i + 0,72)$$

Relazione (5.3)

$$\frac{Z_{\max}}{Z_m} = A(\lambda) \cdot F_{d90}^{B(\lambda)}$$

$$\frac{Z_{\max}}{Z_m} = (1,39 \cdot \lambda^{1,33}) \cdot F_{d90}^{(-0,81 \cdot \ln \lambda - 0,25)}$$

Relazione (5.4)

$$L_o = f_1(\lambda) \cdot Z_{\max}^{f_2(\lambda)}$$

$$L_o = (-0,3 \cdot \lambda + 11,2) \cdot Z_{\max}^{(-0,03 \cdot \lambda + 0,41)}$$

Relazione (5.5)

$$Z_M = 0,27 \cdot e^{Z_{\max} \cdot 0,52}$$

Relazione (5.7.1)

$$Z = -2,45 \cdot X^3 + 7,59 \cdot X^2 - 5,13 \cdot X$$

Relazione (5.7.2)

$$V_s = V_{calc} \cdot (-0,28 \cdot \lambda + 1,15)$$

Bibliografia

- [1] Pagliara S., Ferro V., Dalla Fontana G., Puglisi S., Scotton P. (2004), *Opere di sistemazione idraulico-forestale a basso impatto ambientale*, McGraw-Hill, Milano.
- [2] Pagliara S., Hager W. H. (2004), *Scour downstream of block ramps*, Proceedings of Second
- [3] Pagliara S., Palermo M., Chiavaccini P., Hydraulic Jump downstream of rock chutes, International Symposium on Hydraulic Structures , Ciudad Guayana, Venezuela, Ottobre 2006
- [4] Pagliara S., Hager W. Hydraulics of Plane Plunge Pool Scour, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 132, 5.May 2006
- [5] Peruginelli A., Pagliara S., Cioni F (2001), *La progettazione idraulica delle rampe in pietrame*, ETS, Pisa.
- [6] Mazzoncini S., *Analisi sperimentale degli scavi a valle di strutture in pietrame*. Tesi di laurea A.A 2003-2004
- [7] Di Matto D., *Analisi sperimentale del risalto idraulico a valle di rampe in pietrame*. Tesi di laurea A.A 2003-2004
- [8] Rajaratnam N., Macdougall R. K. (1983), *Erosion by plane wall jets with minimum tailwater*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 109, 7.
- [9] Rajaratnam N. (1981), *Erosion by plane turbulent jets*, Journal of Hydraulic Research, vol. 19, 4.
- [10] Chanson H., Montes J. S. (1995), *Characteristic of Undular Hydraulic Jumps: Experimental Apparatus and Flow Patterns*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 121, 2.
- [11] Reinauer R., Hager W.H. (1995), *Non-breaking undular hydraulic jump*, Journal of Hydraulic Research, vol.33, 5.
- [12] Ohtsu I., Yasuda Y., Gotoh H., Iahr I. (2001), *Hydraulic condition for ondular-jump formation*, Journal of Hydraulic Research, vol. 39, 2.
- [13] Farhodi J., Smith K. V. H.(1985), *Local scour profiles downstream of hydraulic jump*, Journal of Hydraulic Research, vol. 23, 4.
- [14] Hassan N. M. K. N., Narayanan R. (1985), *Local Scour Downstream of an Apron*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 111, 11.
- [15] Bormann Noel and Pierre Y. Julien , *Scour Downstream of Grade-control Structures* Journal of Hydraulic Engineering, vol. 117, 5.
- [16] Subhasish Dey and Rajkumar V. Raikar, *Scour in Long Contractions*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 131, 2.

- [17] M.Mossa, *experimental study on the scour downstream of grade-control structures*, XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Catania, 9-12 settembre 1998.
- [18] D'Agostino V. and Ferro Vito, *Scour on Alluvional Bed Downstream of Grade-Control Structures*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 130, 1.
- [19] A.Veronese, *Erosioni di Fondo a Valle di Uno Scarico*, Istituto di Idraulica della R.Università –Padova 1937
- [20] B.Dargaghi, *Scour development downstream of a spillway*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 41, 4.

Ringraziamenti

Al termine di questo lavoro, avvincente se pur estenuante, non posso che porre l'attenzione su quelle persone che sono state fondamentali nel percorso degli studi e a cui devo i miei ringraziamenti per il contributo che mi hanno offerto.

Voglio ringraziare il Professore Ing. Stefano Pagliara per i consigli forniti, la disponibilità e lo stimolo sempre vivo nei confronti della ricerca, il prof. Maurizio Venutelli per la cortesia sempre dimostrata e l'Ing. Michele Palermo, bussola di alta precisione nella rotta intrapresa. Un ringraziamento sentito a tutti i tecnici del dipartimento che si sono resi sempre fondamentali nella realizzazione dei modelli.

Non posso certo dimenticare alcuni dei miei più cari amici come Marzia e Alessandro che mi sono stati vicini fin da quando interruppi gli studi per molti anni e che, sempre presenti, mi hanno sostenuto nei momenti più difficili; Massimo amico vero con cui ho condiviso tutto, gioie e dolori, di questo percorso universitario iniziato insieme e così concluso.

A mia nonna Isola che mi ha sempre considerato "bravo" a prescindere dai risultati conseguiti sostenendomi con affetto.

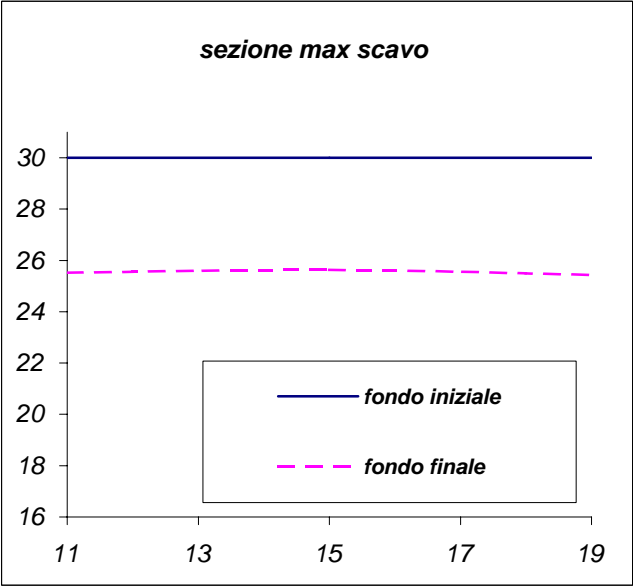
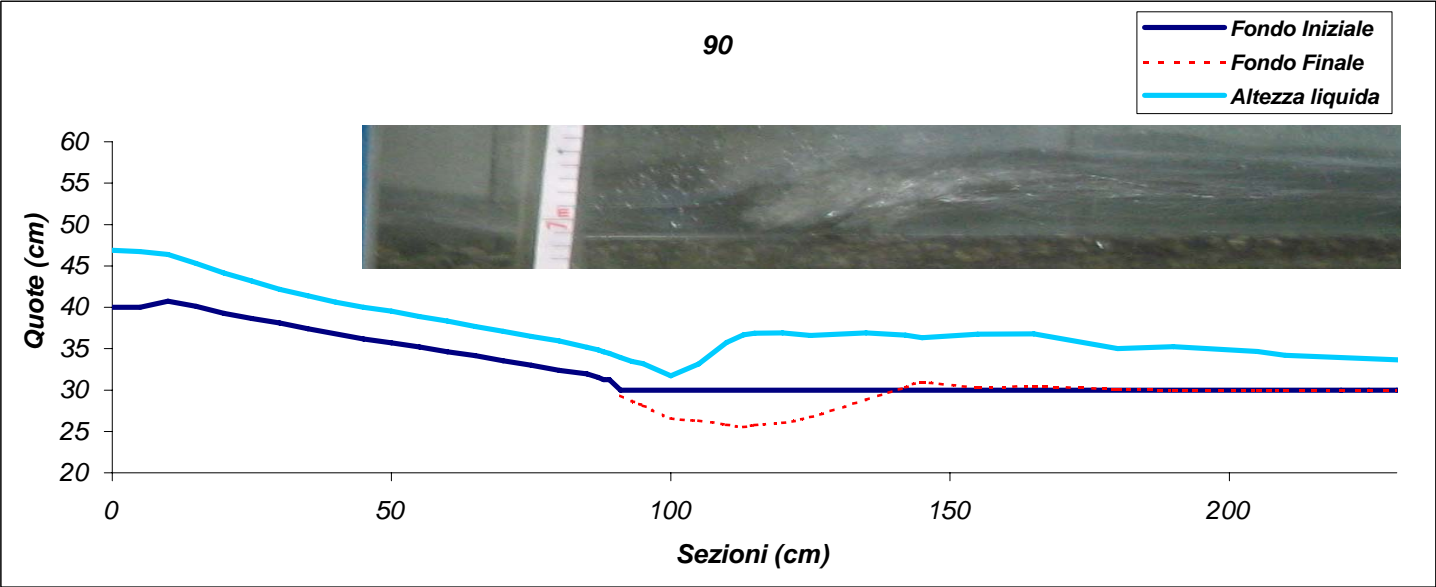
Fondamentale è stato il contributo dei miei zii, Alfredo e Grazia, del cugino Renè, che è stato disponibile per interessanti riflessioni, ma anche di mia cugina Sabrina che, forse inconsapevolmente, mi è stata vitale per trovare la forza di riprendere dopo le sconfitte; i miei zii di Brescia sempre vicini col pensiero. Ringrazio Valentina per il valido supporto tecnico-fotografico e mio fratello Nicola, che non si è mai defilato nei momenti in cui il suo aiuto era necessario.

A mio padre Claudio e mia madre Teresa che dire, oltre a dedicargli questo lavoro, avrò tutta la vita per ringraziarli di aver creduto in me anche quando neppure io ero in grado di farlo. Infine Federica che nell'amore e con l'amore mi ha fatto trascorrere questi anni con intensa felicità...spero di ricompensarla negli anni futuri insieme.

Un grazie a tutti, ma anche, in modo inconsueto, a me che certo dei sacrifici compiuti comunque vada il futuro non avrò rimpianti.....

Dati sperimentali modello Asimmetrico

	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
90	4,995	1	0,125	A4	12,5	80	12,5	120	M1	1,2	4,56	4,47	1,4305	1,40228	3,1877	4,978	1,25	2,24172	4,1153	3,625	0	50,47	23	100	55	1,25	1,5616	2,850492117



profilo scavo

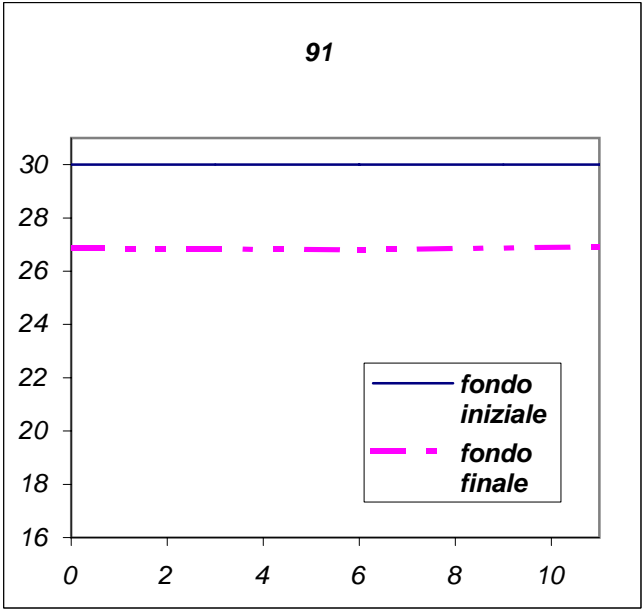
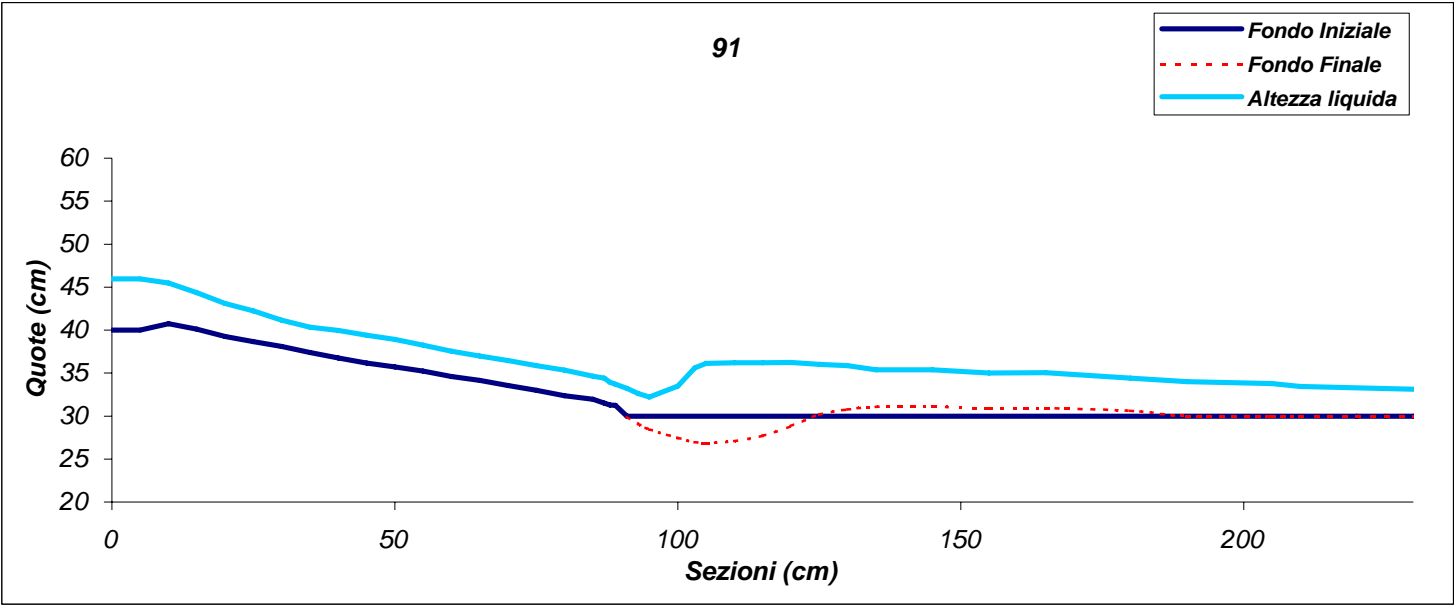
X	91	93	95	100	105	110	113	115	120	125	135	142	145	155	165	180	190	205
0																		
3																		
6																		
9																		
11	29	28,5	28	26,8	26	25,8	25,5	25,9	26	26,9	29	30,45	31,25	30,55	30,6	30,3	30	30
13																		
15	29	28,75	28	26,6	26	25,8	25,6	25,8	26	26,82	28,8	30,26	30,62	30,05	30,4			
17																		
19	29	28,78	28	26,5	26	25,8	25,4	25,5	26,1	26,5	28,7	30,29	30,84	30,42	30,31			
21																		
24																		
27																		
30																		

fondo mobile

σ	1,2
d16	4,35
d50	5,75
d84	6,24
d90	7,41



prova	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1 (zmax+h0/h1)	calcolato
91	3,795	1	0,125	A4	12,5	80	12,5	120	M1	1,2	3,2	3,15	1,2968	1,27651	2,4677	3,77	1,23	2,50056	4,0389	3,558	0	34,38	15	100	55	1,28	1,5278	2,841395506

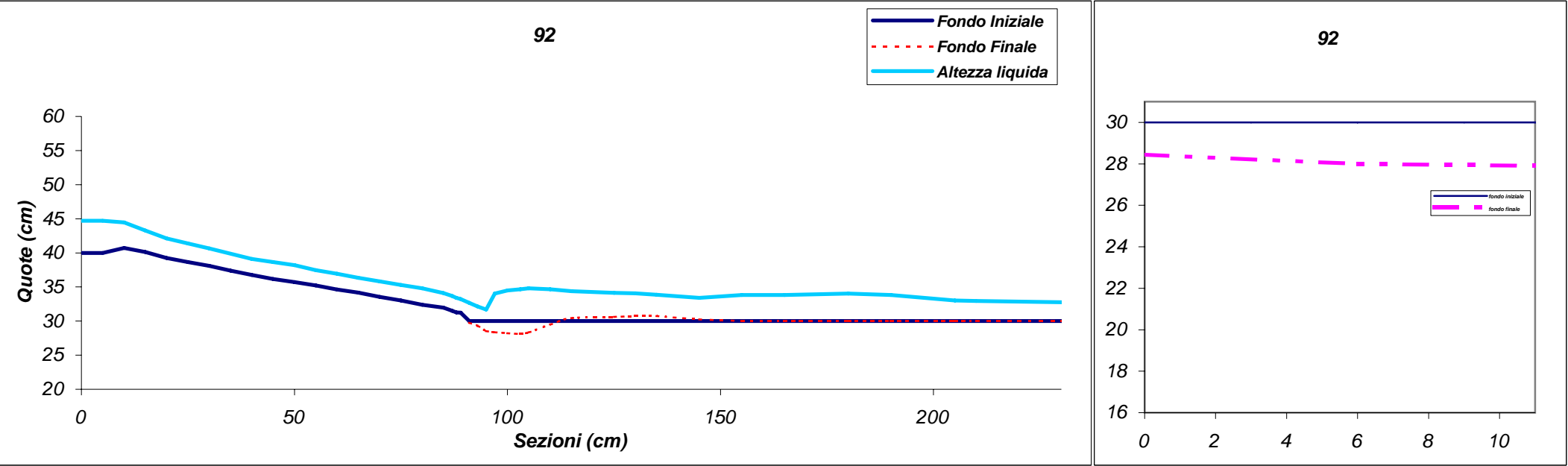


X	91	93	95	100	103	105	110	115	120	125	130	135	145	155	165	180	190	200
0																		
3																		
6																		
9																		
11	30	28,85	28	27,7	27	26,9	27,3	28,1	29,1	30,5	31,4	31,5	31,28	30,78	31	30,8	30	30
13																		
15	30	29,26	29	27,4	27	26,8	27	27,6	28,6	30,05	30,6	30,8	30,85	31	30,7	30,7	30	30
17																		
19	30	29,1	28	27,3	27	26,9	26,9	27,5	28,9	29,94	30,4	30,9	31,2	30,7	31	30,4	30	30
21																		
24																		
27																		
30																		

fondo mobile	
σ	1,2
d16	4,35
d50	5,75
d84	6,24
d90	7,41



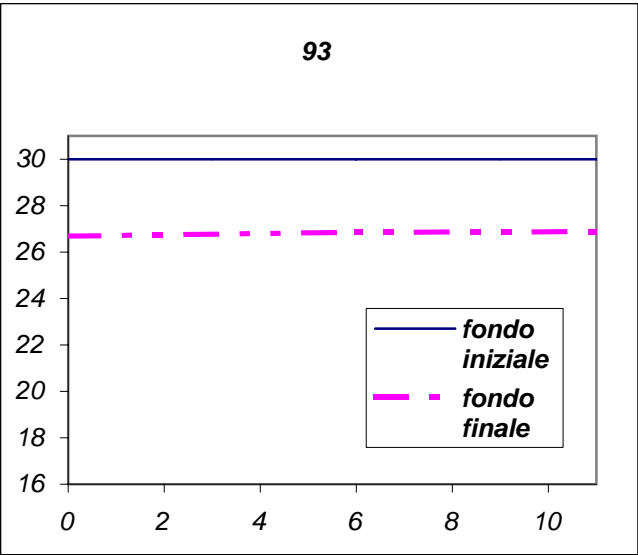
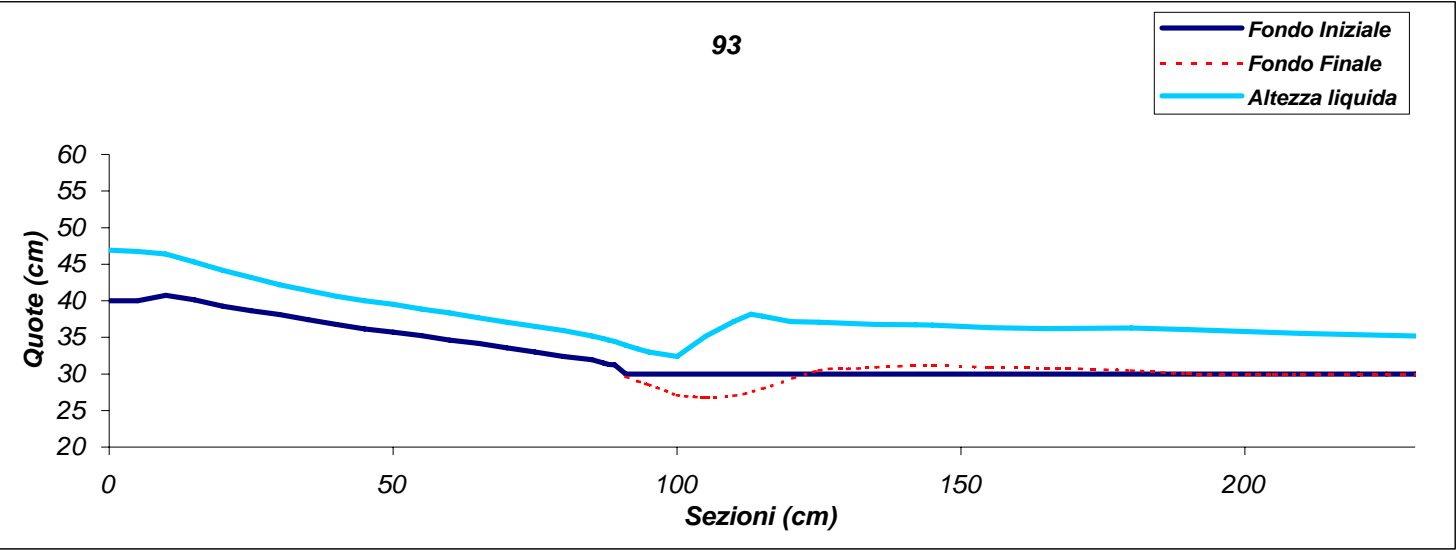
	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
92	2,535	1	0,125	A4	12,5	80	12,5	120	M1	1,2	2,1	1,88	1,0261	0,91857	2,0467	3,618	0,99	2,21138	3,2529	2,865	0	22,7	13	65	40	1	1,7676	2,749464975



	X	91	93	95	97	100	103	105	110	115	125	130	135	145	155	165	180	190	205	210
y	0																			
	3																			
	6																			
	9																			
	11	30	29,4	29	28,6	28	28,5	28,7	30,4	30,7	30,5	30,5	30,6	30,29	30	30	30	30	30	30
	13																			
	15	30	29,38	29	28,4	28	28	28,2	29	30,4	30,6	31	31	30,18	30	30	30	30	30	30
	17																			
	19	30	29,12	28	28,1	28	27,9	28,2	29,1	30,3	30,72	30,7	30,58	30,32	30	30	30	30	30	30
	21																			
	24																			
	27																			

fondo mobile	
σ	1,2
d16	4,35
d50	5,75
d84	6,24
d90	7,41

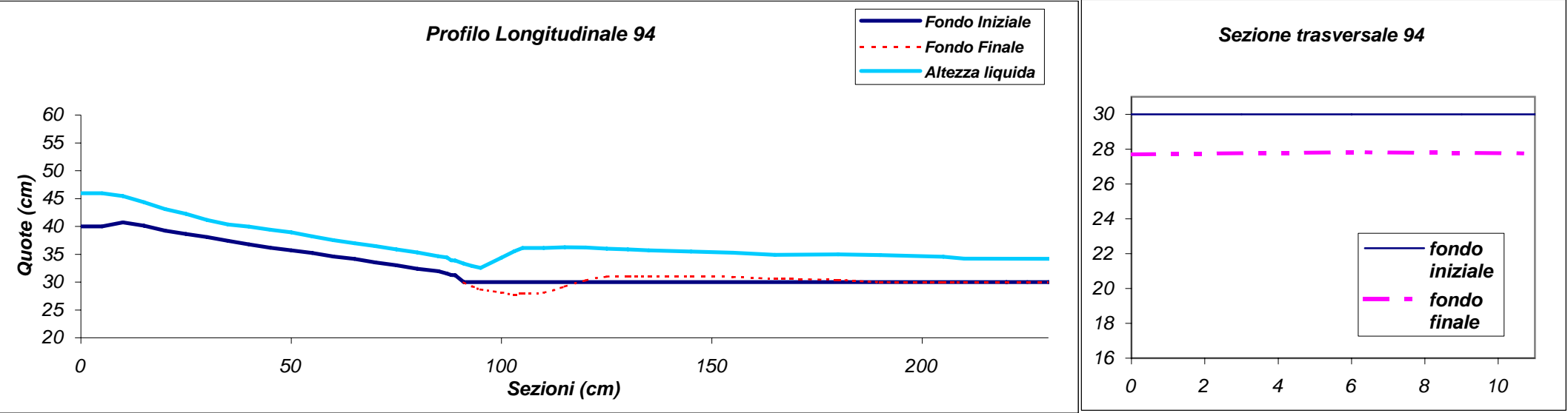
	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
93	4,775	1	0,125	A4	12,5	80	12,5	120	M1	1,2	3,32	3,2	1,0415	1,00387	3,1877	5,832	1,2	2,14299	3,934	3,465	0	33,13	15	100	55	1,22	1,8296	2,828955334



X	91	93	95	98	100	103	105	110	115	125	130	135	145	155	165	180	190	205
0																		
3																		
6																		
9																		
11	30	29	29	27,6	27	26,8	26,7	27	28,1	30,75	30,7	31,1	31	30,78	30,6	30,3	30,1	30
13																		
15	30	29,1	29	27,7	27	27	26,9	27	27,9	30,25	30,9	30,9	31,22	31	30,77	30,4	30	30
17																		
19	30	28,98	28	27,8	27	26,9	26,9	27	27,9	30,4	30,4	30,72	31,2	30,89	31	30,7	30	30
21																		
24																		
27																		
30																		

fondo mobile	
σ	1,2
d16	4,35
d50	5,75
d84	6,24
d90	7,41

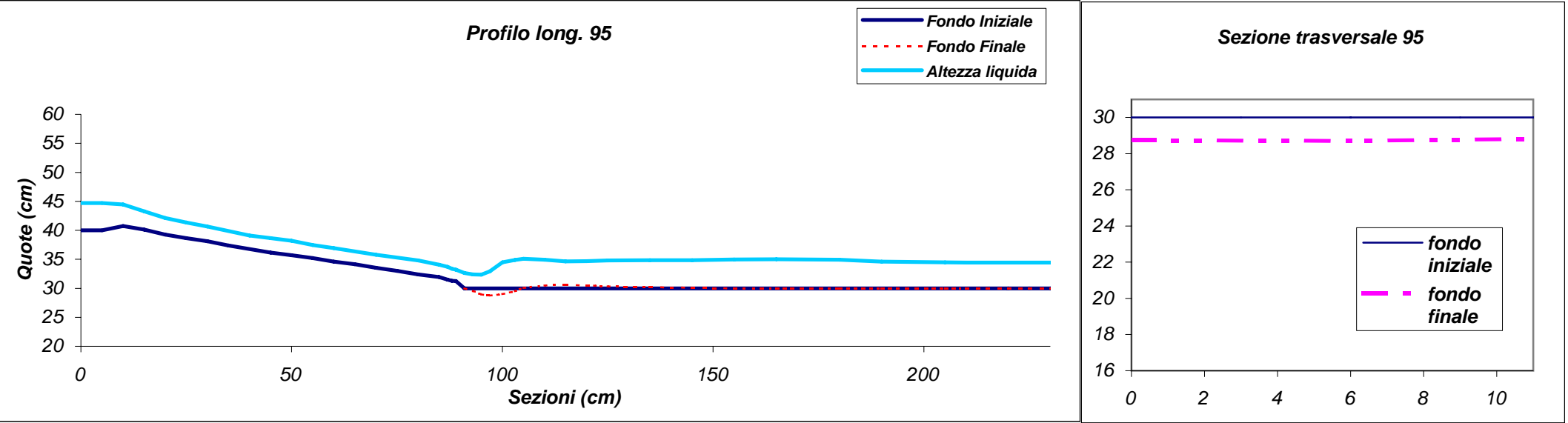
prova	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1 (zmax+h0/h1)	calcolato
94	3,76	1	0,125	A4	12,5	80	12,5	120	M1	1,2	2,3	2,24	0,872	0,84924	2,6377	4,623	1,14	2,24189	3,7437	3,298	0	28,65	13	100	45	1,1	1,7528	2,806519361



X	91	93	95	100	103	105	110	115	120	125	130	135	145	155	165	180	190	205	210	215
0																				
3																				
6																				
9																				
11	30	29,15	29	28,2	28	27,9	28,2	29,5	30,7	31,25	31,1	31,2	30,94	30,85	30,8	30,3	30	30	30	30
13																				
15	30	29,18	29	28,2	28	28	28	29,2	30,2	30,5	31	31,1	31,1	30,9	30,6	30,5	30	30	30	30
17																				
19	30	29,38	29	28	28	28	28	28,9	30,1	31,2	31,1	30,94	30,92	31	30,4	30,4	30	30	30	30
21																				
24																				
27																				
30																				

fondo mobile	
σ	1,2
d16	4,35
d50	5,75
d84	6,24
d90	7,41

	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
95	2,545	1	0,125	A4	12,5	80	12,5	120	M1	1,2	1,3	1,24	0,6352	0,60586	2,0467	4,497	0,99	2,2201	3,2657	2,877	0	14,75	7	55	25	0,63	2,1971	2,750941615

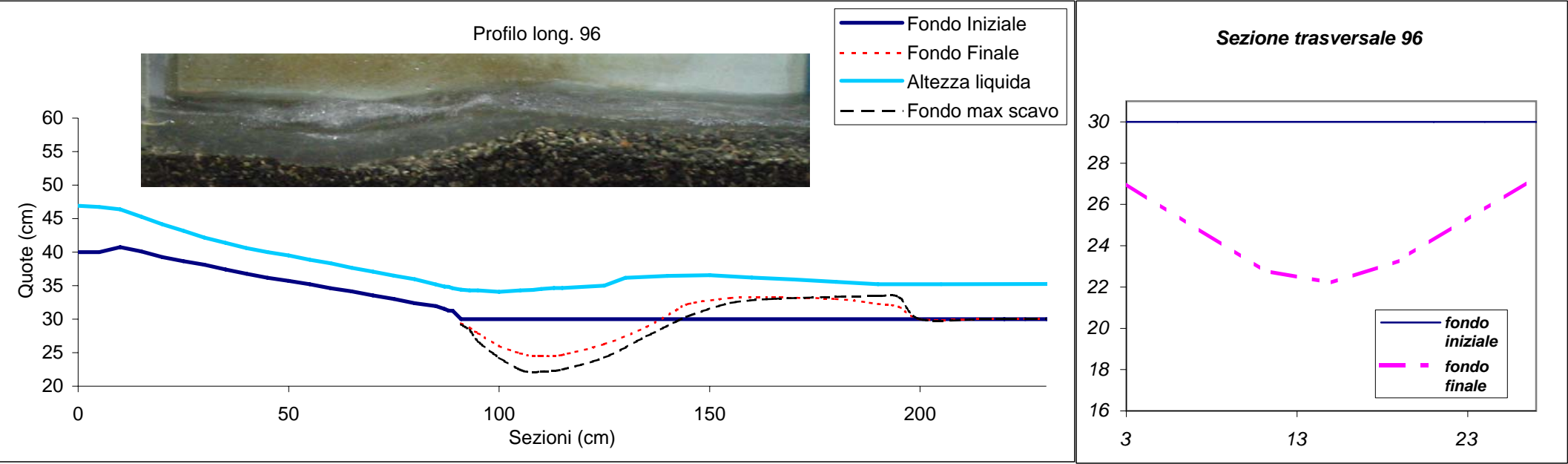


X	91	93	95	97	100	103	105	110	115	120	125	135	145	155	165	180	190	205
0																		
3																		
6																		
9																		
11	30	29,52	29	28,8	29	29,8	30,5	30,7	30,5	30,5	30,4	30,1	30,12	30	30	30	30	30
13																		
15	30	29,45	29	28,7	29	29,3	29,8	30,4	30,6	30,6	30,3	30,38	30,18	30	30	30	30	30
17																		
19	30	29,56	29	28,8	29	29,3	29,9	30,3	30,6	30,41	30,4	30,1	30	30	30	30	30	30
21																		
24																		
27																		
30																		

fondo mobile

σ	1,2
d16	4,4
d50	5,8
d84	6,2
d90	7,4

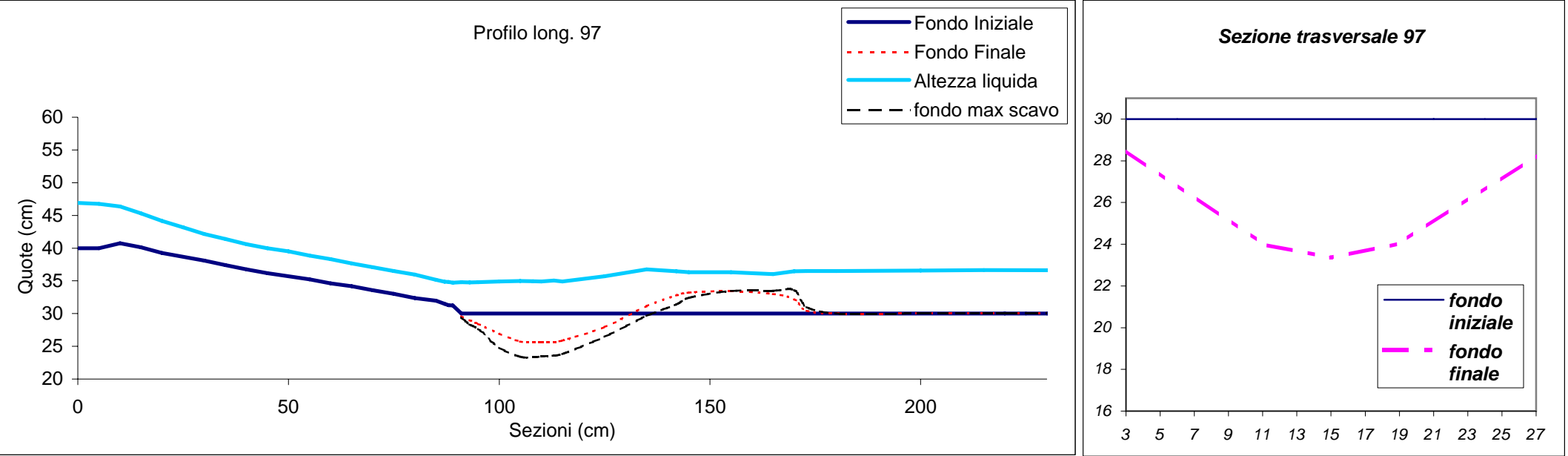
prova	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1 (zmax+h0/h1)	calcolato
96	5,045	2,8	0,125	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	7,95	5,51	2,3584	1,63453	3,371	5,423	1,2	2,08199	3,9304	3,462	18	48,31	18	110	75	3,45	1,6088	3,713433154



X	91	93	95	100	105	108	110	113	115	125	135	142	145	155	165	180	190	195	200
0																			30
3	30	30	30	28,4	27	26,9	27	27,3	27,5	28,55	30,7	34,15	34,5	33,65	32,72	31,2	30	30	30
6																			30
9																			30
11	29	27,55	26	24,2	23	23	22,8	22,5	22,7	25	27,9	30,72	31,95	32,85	33,45	33,8	33,5	33	30
13																			30
15	29	28,32	27	24,2	22	22,1	22,2	22,3	22,5	24,26	27,5	29,6	30,45	32,4	33	33,3	33,45	33,3	30
17																			30
19	29	27,8	27	24,3	23	23,1	23,3	23	23,2	25,1	27,5	29,45	30,45	32,59	33	33,6	33,5	33	30
21																			30
24																			30
27	30	30	30	28,8	28	27,4	27,4	27,2	27,4	28,45	30,7	32,6	34	34,21	34	33,3	30,85	30	30
30																			30



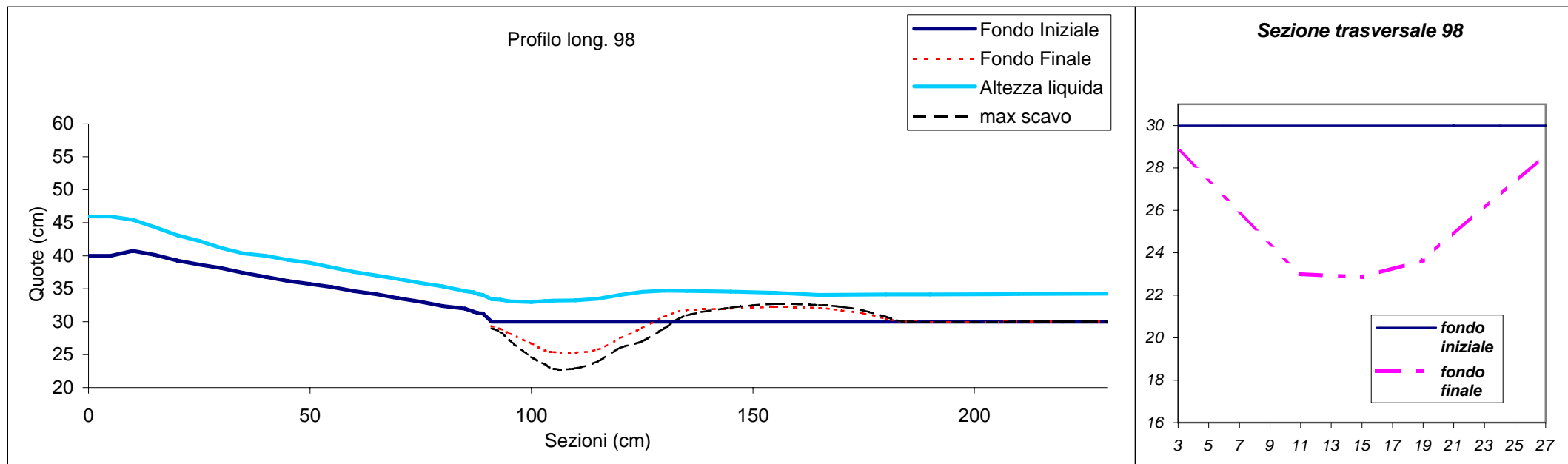
prova	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1 (zmax+h0/h1)	calcolato
97	4,975	2,8	0,125	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	6,65	5,51	1,9104	1,58288	3,481	6,59	1,14	1,95656	3,7534	3,306	16	41,43	18	90	65	3,66	1,8931	3,648599717



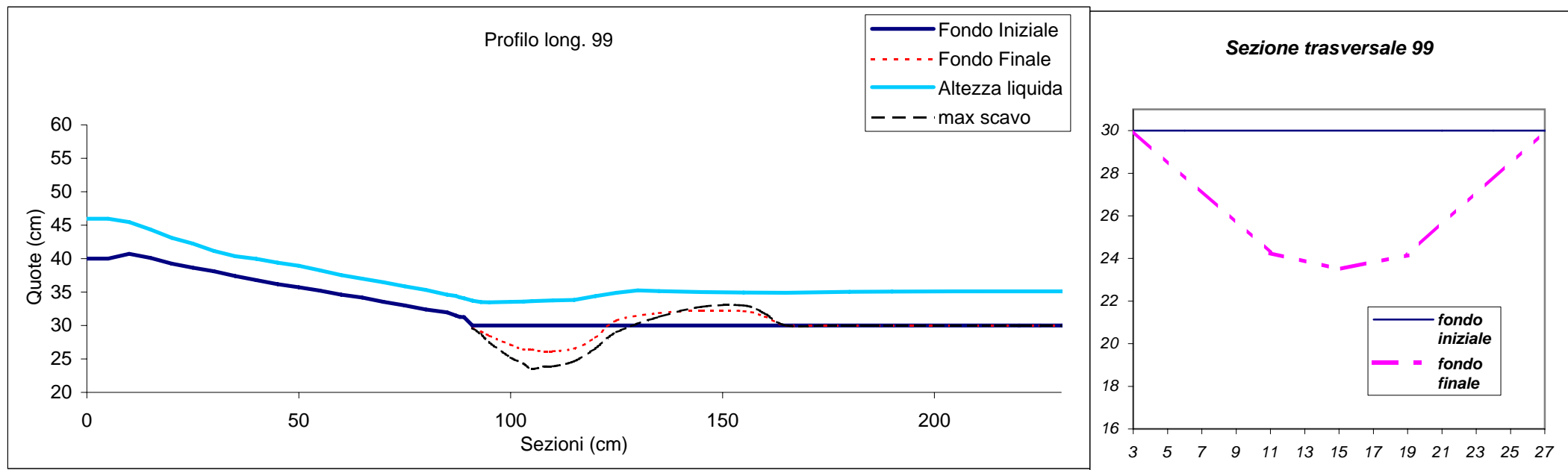
X	91	93	95	100	105	108	110	113	115	125	135	142	145	155	165	170	173	180	200
0																			
3	30	30	30	29,7	29	28,5	28,3	28,5	28,9	30,25	33,4	34,15	34,15	32,6	31,15	31	30	30	30
6																			
9																			
11	29	28,45	27	25,1	24	24	24	23,9	23,9	26,33	30,4	32,26	33,05	33,66	33,6	32,6	30	30	
13																			
15	29	28,33	28	24,8	23	23,4	23,5	23,6	23,8	26,45	29,7	31,4	32,41	33,45	33,5	33,6	31	30	
17																			
19	29	28,1	27	25,1	24	24	24,2	24,1	24,4	26,5	29,7	31,6	32,25	33,5	34	33,6	31,15	30	
21																			
24																			30
27	30	30	30	30	29	28,3	28,3	28,3	28,5	30,2	32,6	34,4	34,2	34	32,6	30,2	30	30	30
30																			



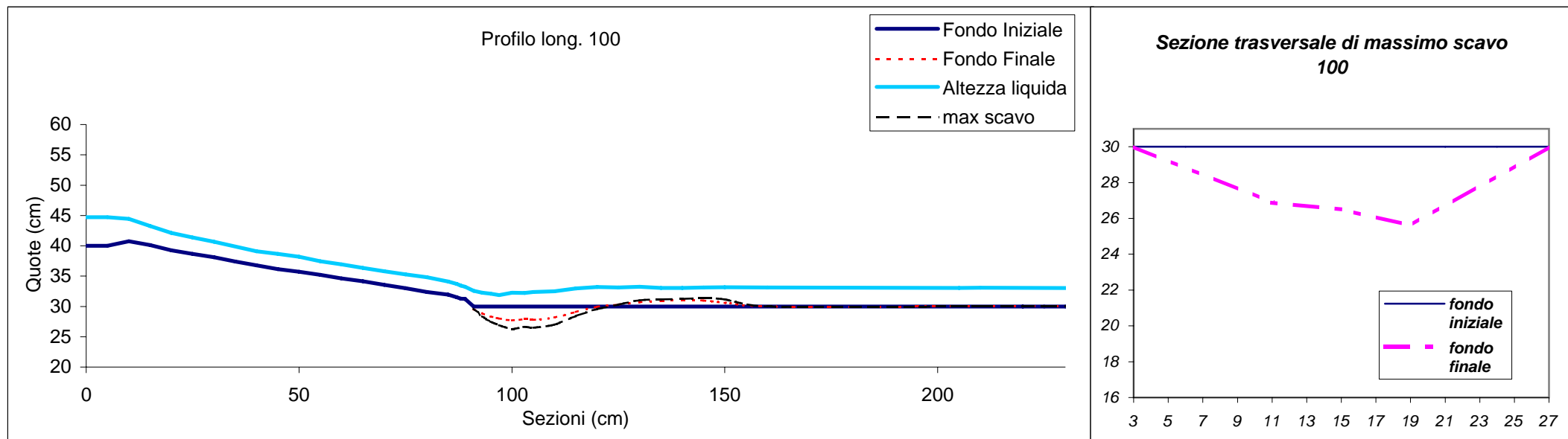
prova																									calcolato			
98	3,79	2,8	0,125	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	7,15	4,61	2,5527	1,64584	2,801	4,202	1,08	2,06502	3,5536	3,13	14,5	37,83	15	95	65	2,78	1,5002	3,576759791

[illegible]

prova																										calcolato		
99	3,79	2,8	0,125	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	6,5	3,62	2,2987	1,28021	2,8277	5,1	1,07	2,03588	3,5201	3,101	19	33,54	15	75	55	2,78	1,8036	3,564852712

[illegible]

prova																										calcolato		
100	2,535	2,8	0,125	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	4,4	2,2	2,112	1,056	2,0833	3,05	0,97	2,15325	3,1956	2,815	0	23,67	15	70	50	1,45	1,464	3,451615801

[illegible]

	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
101	2,51	2,8	0,125	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	3	1,57	1,3493	0,70615	2,2233	4,571	0,9	1,93385	2,9649	2,612	17	20,57	11	60	55	1	2,0559	3,373267038

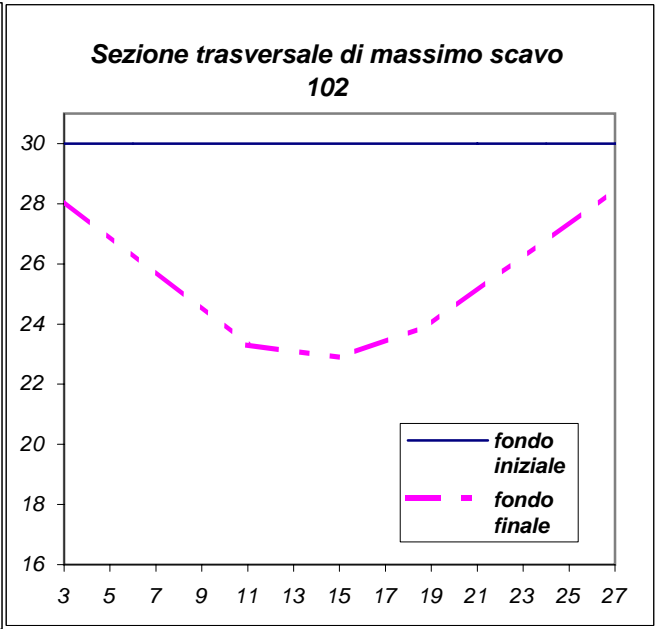
[illegible]

Profilo long. 102

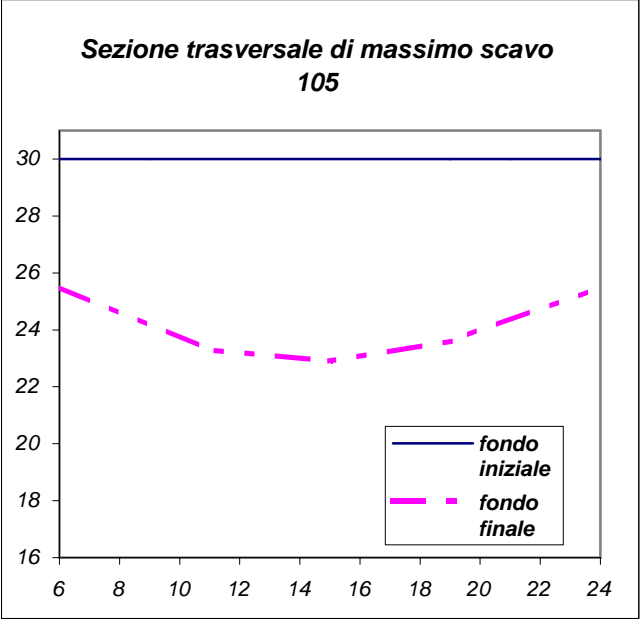
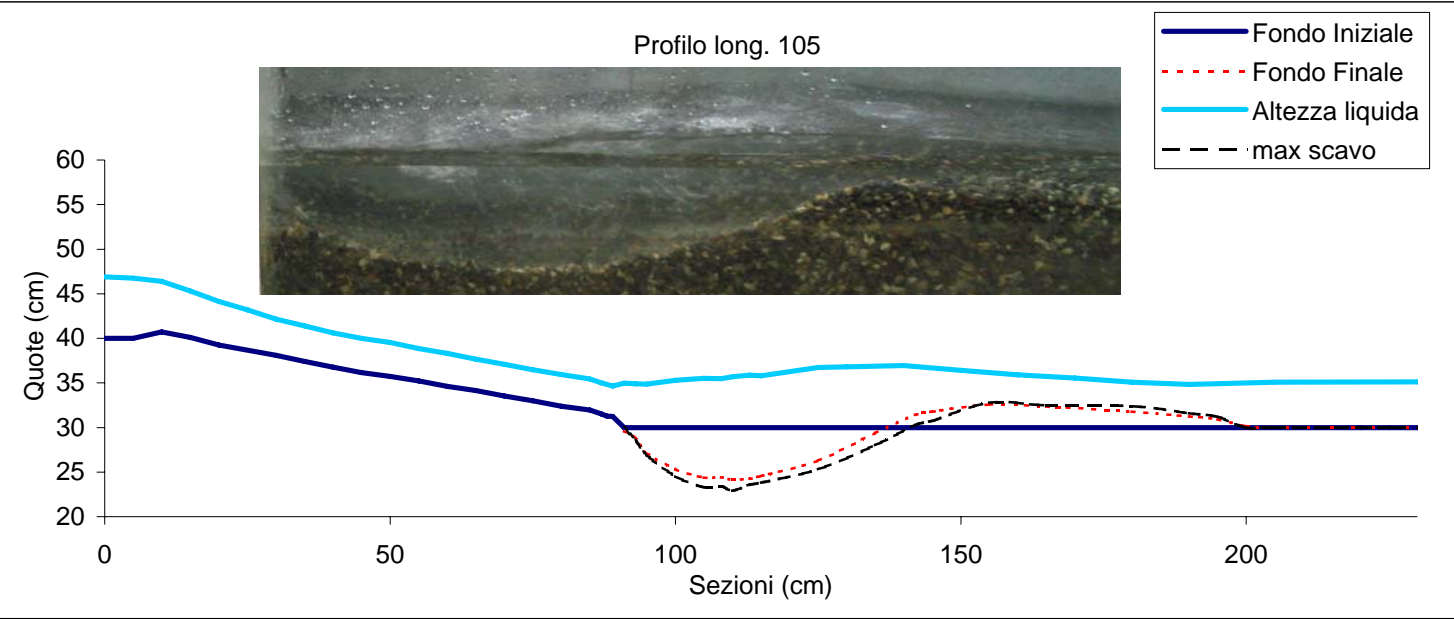
Legend:

- Fondo Iniziale (Solid dark blue line)
- Fondo Finale (Dashed red line)
- Altezza liquida (Solid cyan line)
- fondo finale max scavo (Dashed black line)

The graph displays the longitudinal profile of a road or canal. The 'Altezza liquida' (liquid height) starts at approximately 47 cm and decreases to about 36 cm. The 'Fondo Iniziale' (initial bottom) starts at 40 cm and decreases to 30 cm. The 'Fondo Finale' (final bottom) starts at 40 cm, dips to a minimum of about 25 cm at section 110, and then rises to 30 cm. The 'fondo finale max scavo' (final bottom max excavation) starts at 40 cm, dips to a minimum of about 23 cm at section 110, and then rises to 30 cm. The 'Fondo Iniziale' and 'Fondo Finale' lines are identical from section 175 to 225, where they both remain constant at 30 cm.

[illegible]

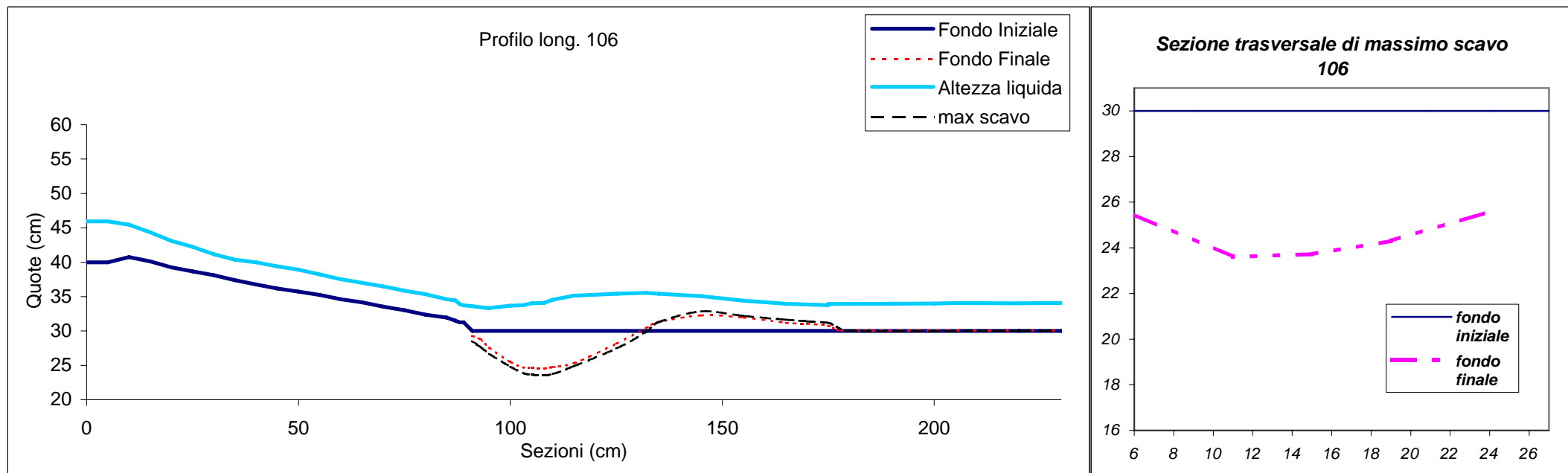
prova	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1 (zmax+h0/h1)	calcolato
105	4,95	1,8	0,125	A4	12,5	80	22,5	120	M1	1,2	7,1	5,84	2,0734	1,70544	3,4243	5,167	1,16	1,99525	3,7964	3,344	25	47,16	20	115	65	3,2	1,5088	3,884797719



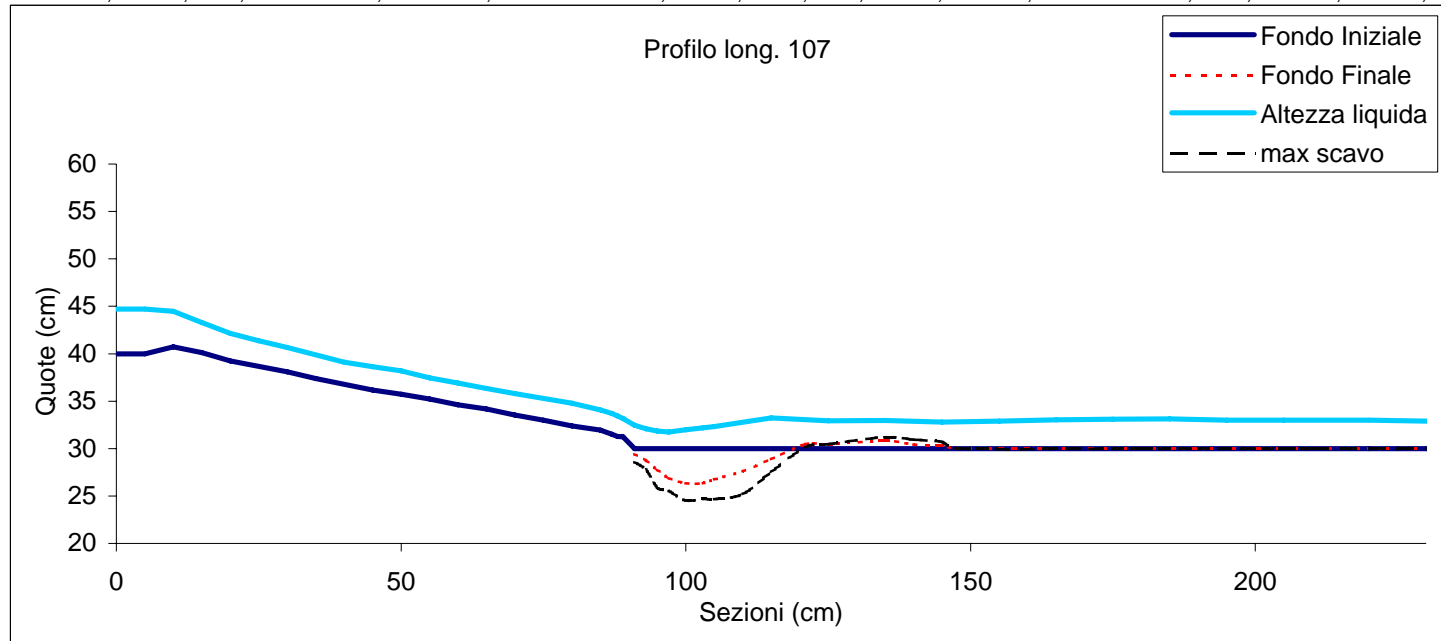
X	91	93	95	100	105	108	110	113	115	125	135	142	145	155	165	180	190	195	200	205
0																				
3																				
6	30	29	27,29	26	25,5	25	25,5	25,2	25,3	27,4	31,9	33,7	33,4	32,6	31,45	30,5	30	30	30	30
9																				30
11	28,59	28	26,45	25	23,9	24	23,3	23,3	24,1	25,8	29,25	31,3	32,05	33,2	33	31,8	31,4	30,45	30	30
13																				30
15	30	29	26,89	25	23,3	23	22,9	23,6	23,8	25,3	28	30,3	30,75	32,8	32,48	32,4	31,6	31,2	30	30
17																				30
19	29,4	28	26,35	25	23,4	24	23,6	23,9	24	25,8	28,1	30,4	30,7	31,5	32,5	32,3	31,8	31,65	30	30
21																				30
24	30	30	28,5	26	25,7	26	25,5	25,3	25,5	27	29,6	31,4	32,05	32,81	32,36	31,8	31,4	31,2	30,84	30
27																				
30																				



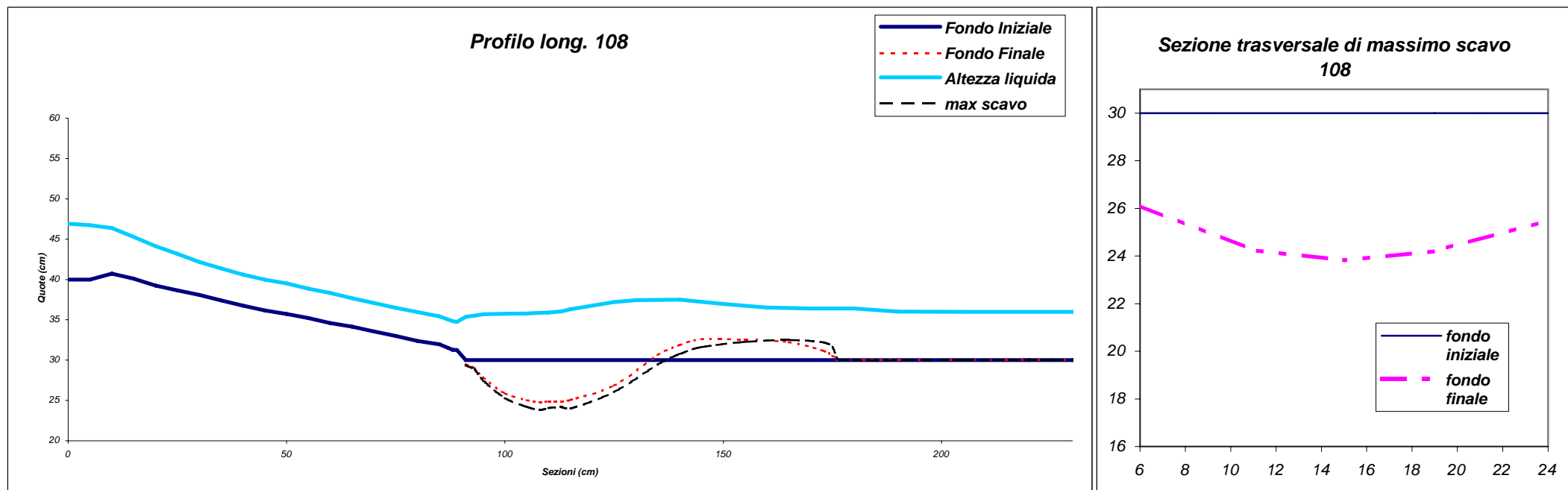
	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
106	3,79	1,8	0,125	A4	12,5	80	22,5	120	M1	1,2	5,4	5,46	2,5935	2,21262	2,4677	4,08	1,23	2,49727	4,0336	3,553	0	40,73	18	87	55	2,85	1,6534	3,958713288

[illegible]

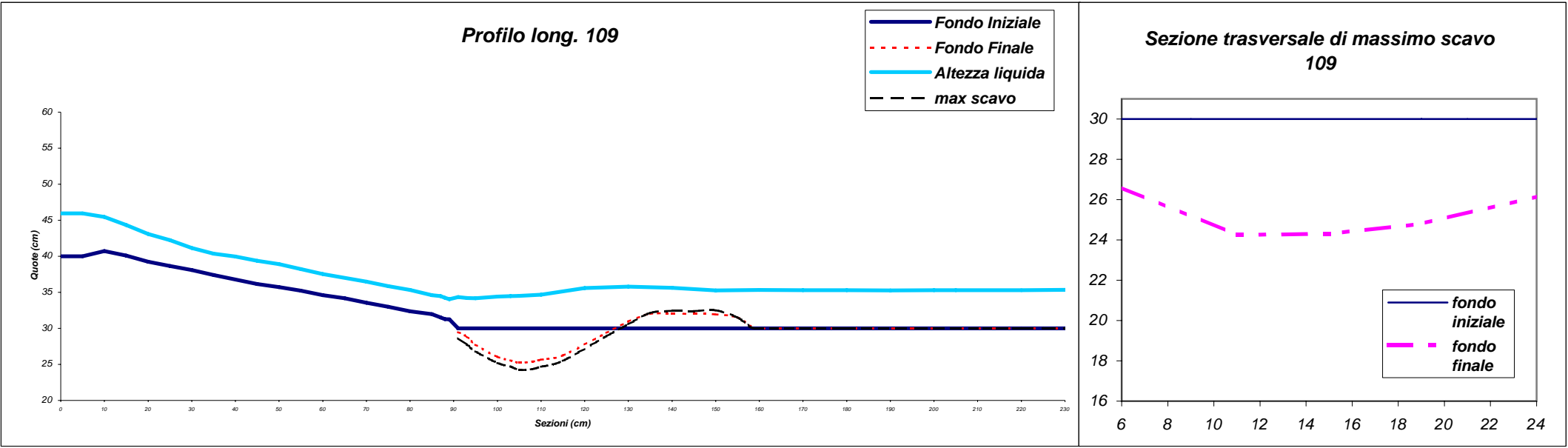
	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
107	2,535	1,8	0,125	A4	12,5	80	22,5	120	M1	1,2	4,48	3,64	2,6841	1,78286	2,0417	3	0,99	2,21951	3,2609	2,872	23	29,19	10	58	45	1,23	1,4694	3,722975223

[illegible]

	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
108	4,95	1,8	0,125	A4	12,5	80	22,5	120	M1	1,2	6,18	5,23	1,7568	1,48678	3,5177	5,91	1,13	1,91637	3,6956	3,255	18	43,36	18	86	55	4,9	1,6801	3,853831108

[illegible]

prova																										calcolato		
109	3,785	1,8	0,125	A1	12,5	80	22,5	120	M1	1,2	4,75	4,78	2,0553	1,70857	2,7977	5,3	1,08	2,06599	3,5531	3,13	25	36,95	15	69	50	2,42	1,8944	3,810435708

[illegible]

Profilo long. 110

Quote (cm)

Sezioni (cm)

Legend:

- Fondo Iniziale (solid blue line)
- Fondo Finale (dashed red line)
- Altezza liquida (solid cyan line)
- max scavo (dashed black line)

Sezione trasversale di massimo scavo 110

Quote (cm)

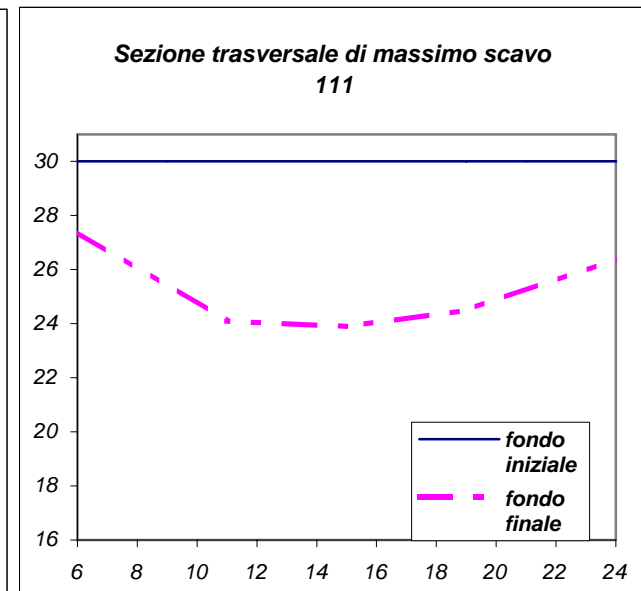
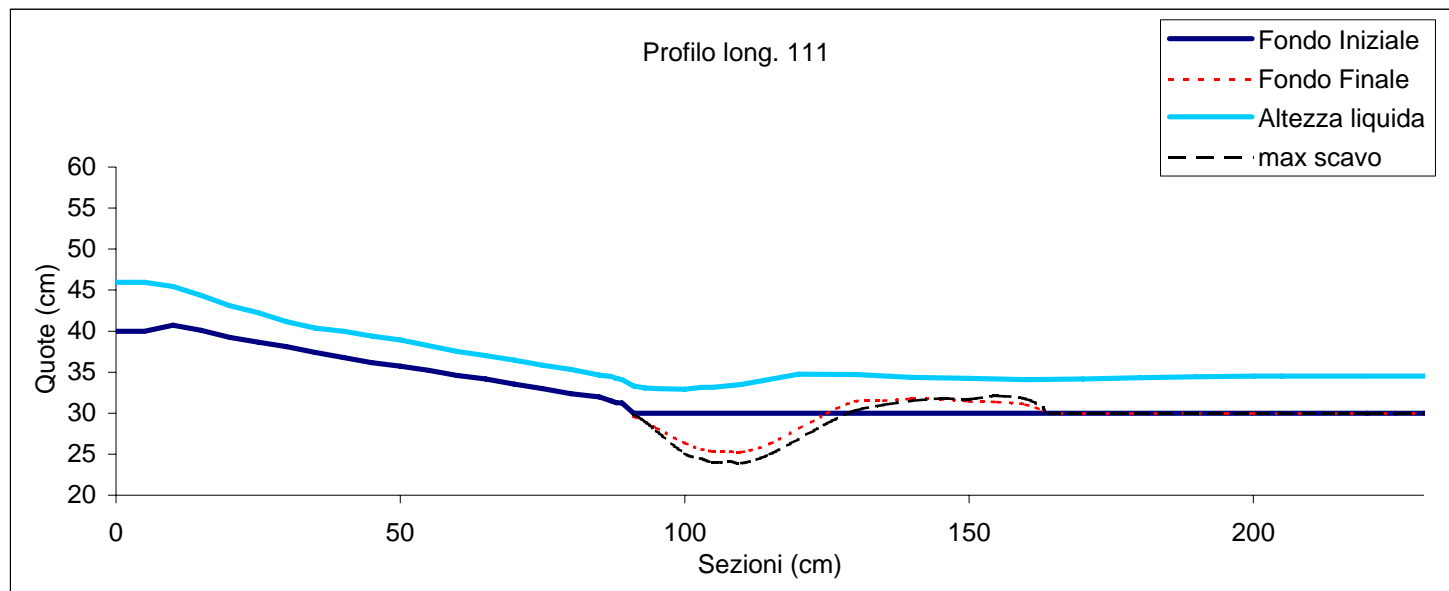
Sezioni (cm)

Legend:

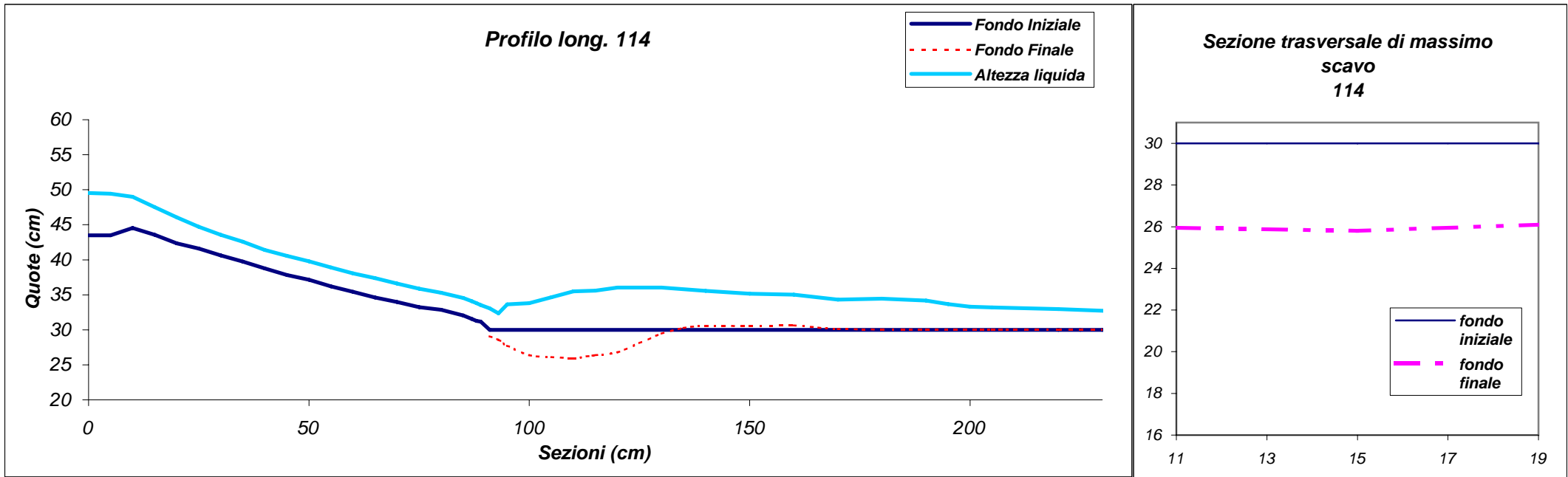
- fondo iniziale (solid blue line)
- fondo finale (dashed magenta line)

[illegible]

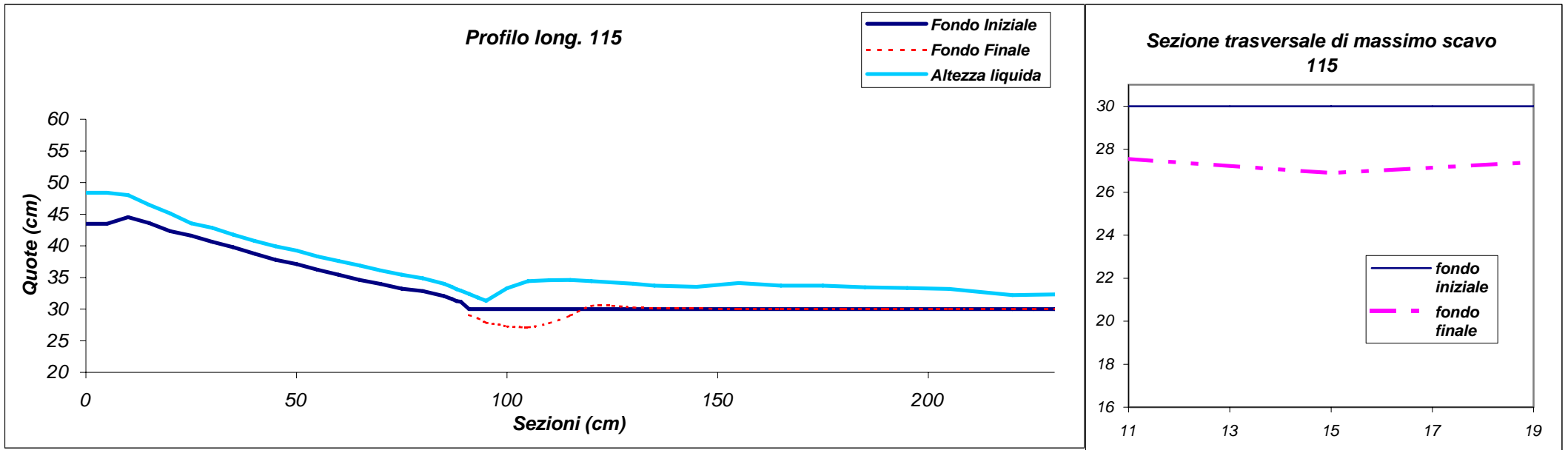
	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
111	3,785	1,8	0,125	A1	12,5	80	22,5	120	M1	1,2	6,1	4,74	2,1396	1,66257	2,851	4,5	1,06	2,00829	3,4866	3,071	28	35,2	20	74	50	2,42	1,5784	3,790365563

[illegible]

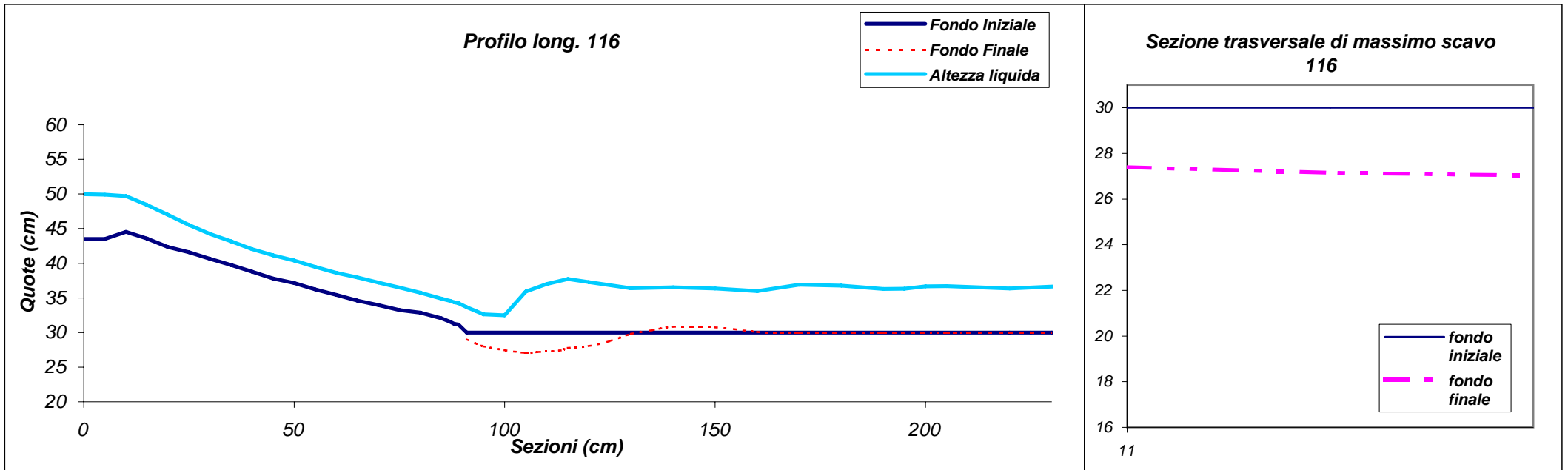
	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
114	3,75	1	0,167	A4	12,5	80	12,5	120	M1	1,2	4,2	4,05	1,7839	1,72023	2,3543	3,25	1,27	2,65146	4,1831	3,685	0	43,43	20	80	70	0,8	1,3804	3,121205267

[illegible]

	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
115	2,565	1	0,167	A4	12,5	80	12,5	120	M1	1,2	3,11	2,72	1,7594	1,53875	1,7677	2,75	1,16	2,78768	3,8109	3,357	0	28,33	10	50	35	0,8	1,8207	3,072966022

[illegible]

	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
116	4,925	1	0,167	A4	12,5	80	12,5	120	M1	1,2	3	2,94	0,9777	0,95817	3,0683	6,677	1,28	2,3405	4,2154	3,713	0	41,99	15	70	50	1,15	2,176	3,125426304

[illegible]

	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
117	3,765	1	0,167	A4	12,5	80	12,5	120	M1	1,2	2,28	2,14	0,9008	0,84552	2,531	5,252	1,19	2,38826	3,9067	3,441	0	31,12	15	75	40	1,2	2,0749	3,085312596

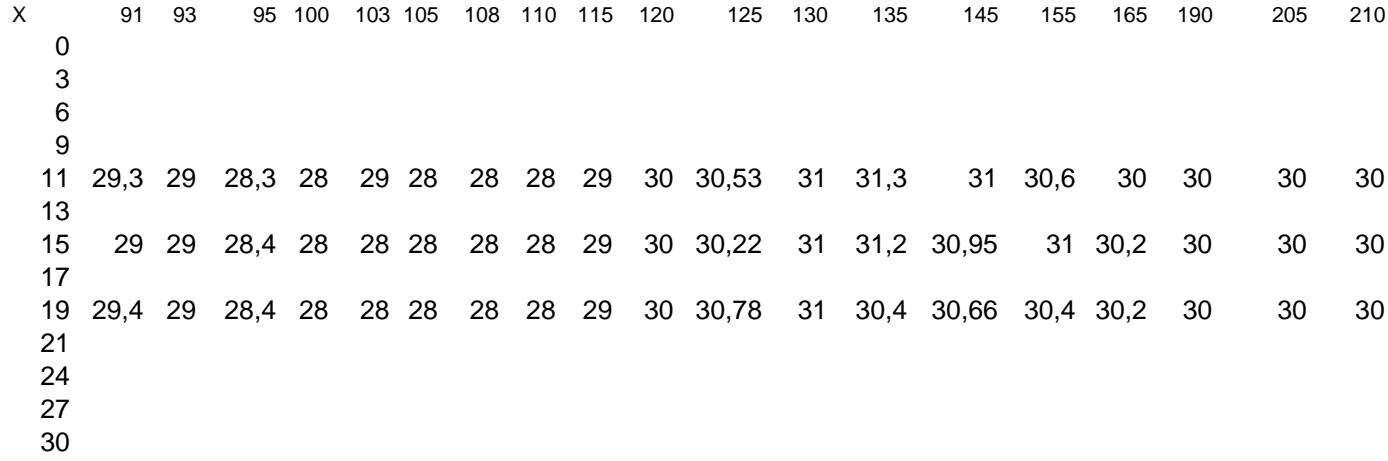
[illegible]

Profilo long. 117

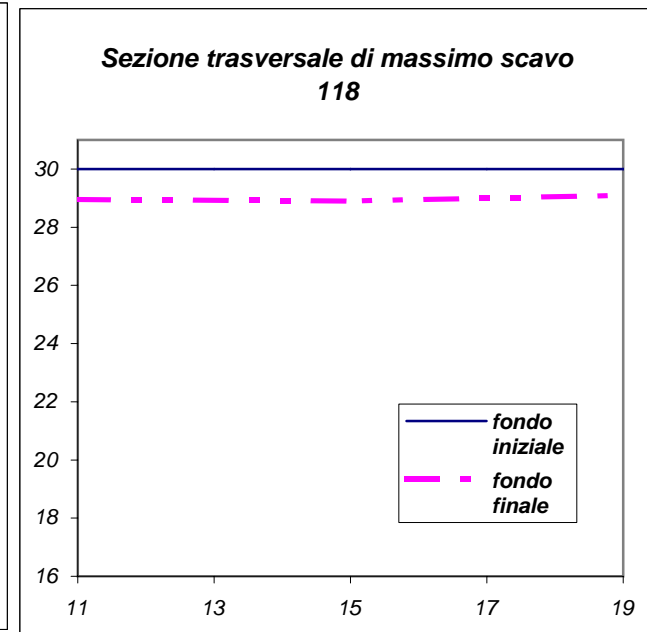
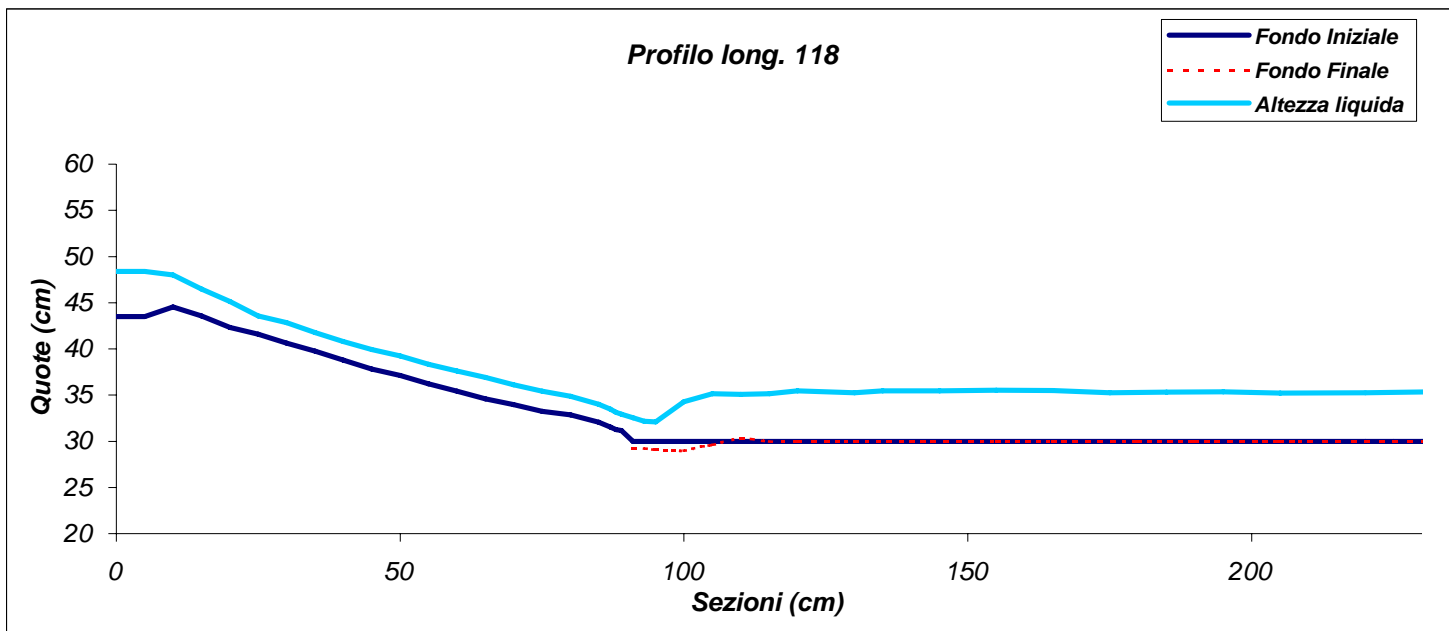
Legend:

- Fondo Iniziale (Dark blue solid line)
- Fondo Finale (Red dashed line)
- Altezza liquida (Cyan solid line)

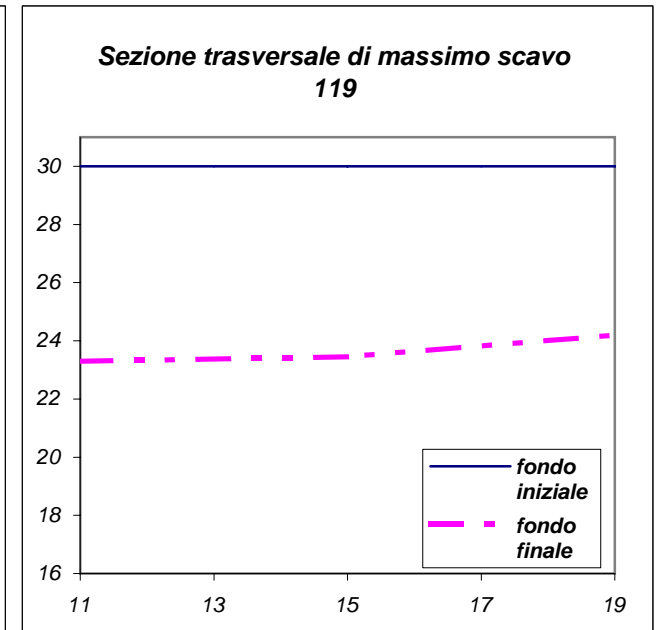
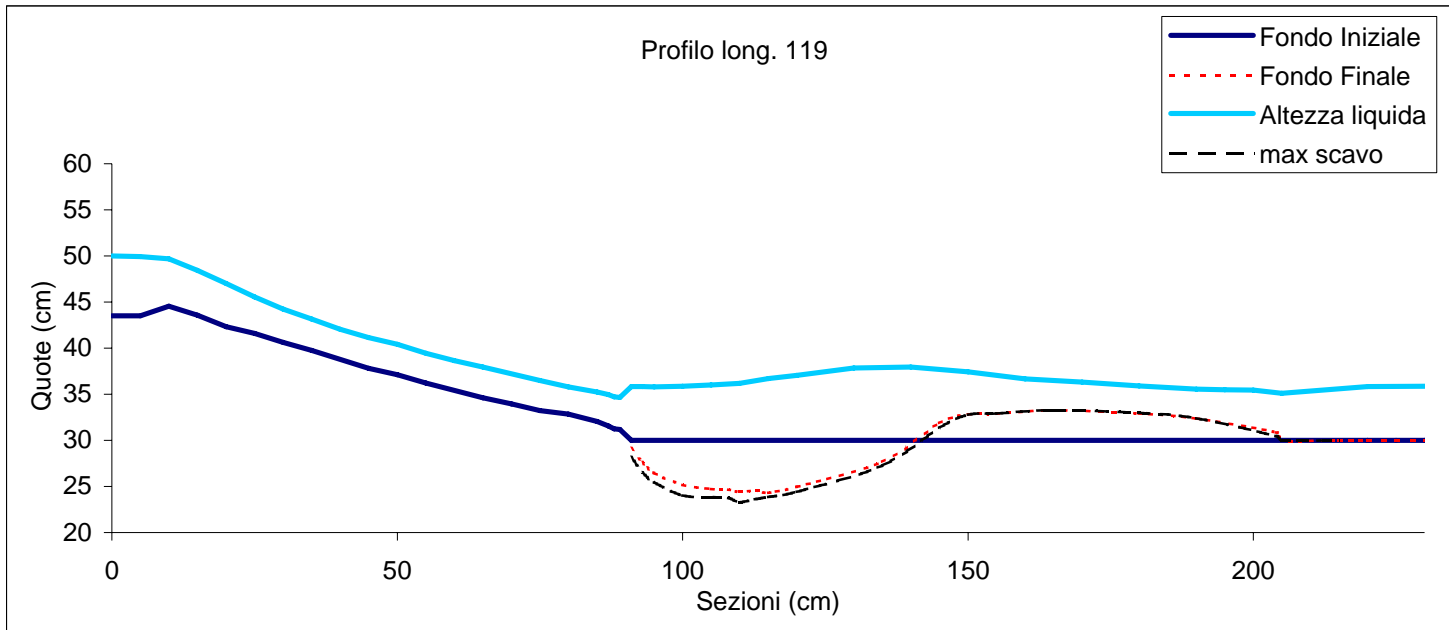
Sezioni (cm)	Fondo Iniziale (cm)	Fondo Finale (cm)	Altezza liquida (cm)
0	43.5	43.5	49.5
15	44.5	44.5	49.0
30	42.0	42.0	45.0
45	38.0	38.0	41.0
60	35.0	35.0	38.0
75	33.0	33.0	35.0
90	30.0	30.0	32.0
105	30.0	28.0	36.0
120	30.0	28.0	36.5
135	30.0	31.0	35.5
150	30.0	30.5	35.0
165	30.0	30.0	35.5
180	30.0	30.0	35.5
195	30.0	30.0	35.5
210	30.0	30.0	35.0
225	30.0	30.0	35.5
240	30.0	30.0	35.5



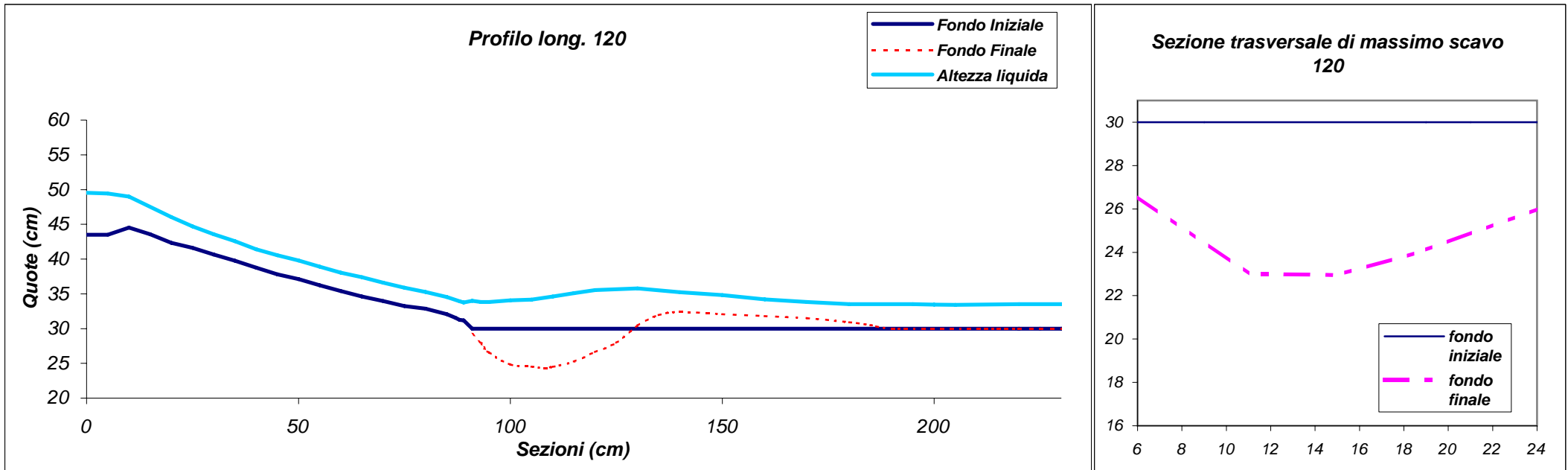
	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
118	2,565	1	0,167	A4	12,5	80	12,5	120	M1	1,2	1,1	1,02	0,6223	0,57703	1,7677	4,46	1,16	2,78768	3,8109	3,357	0	15,26	10	25	20	0,45	2,9512	3,072966022

[illegible]

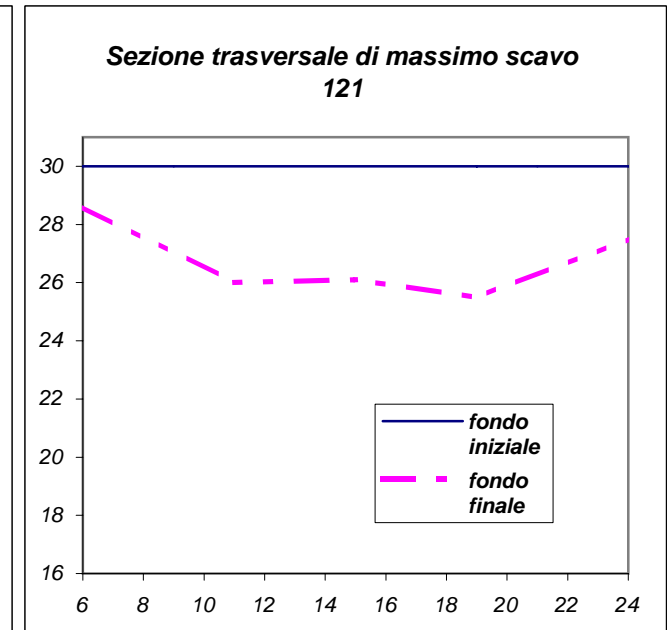
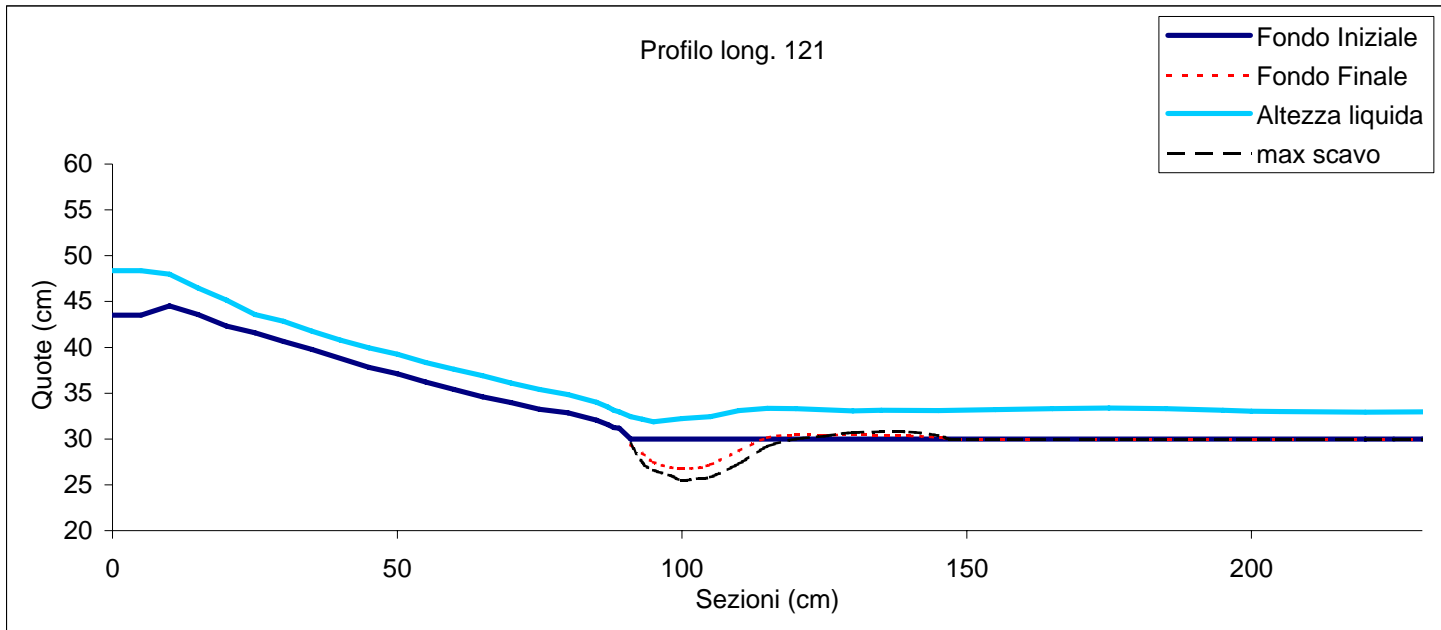
	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
119	4,99	1,8	0,167	A4	12,5	80	22,5	120	M1	1,2	6,7	5,58	1,9247	1,60299	3,18	5,88	1,15	1,96246	3,7647	3,316	30	50,5	20	115	75	3,48	1,467	3,988274024

[illegible]

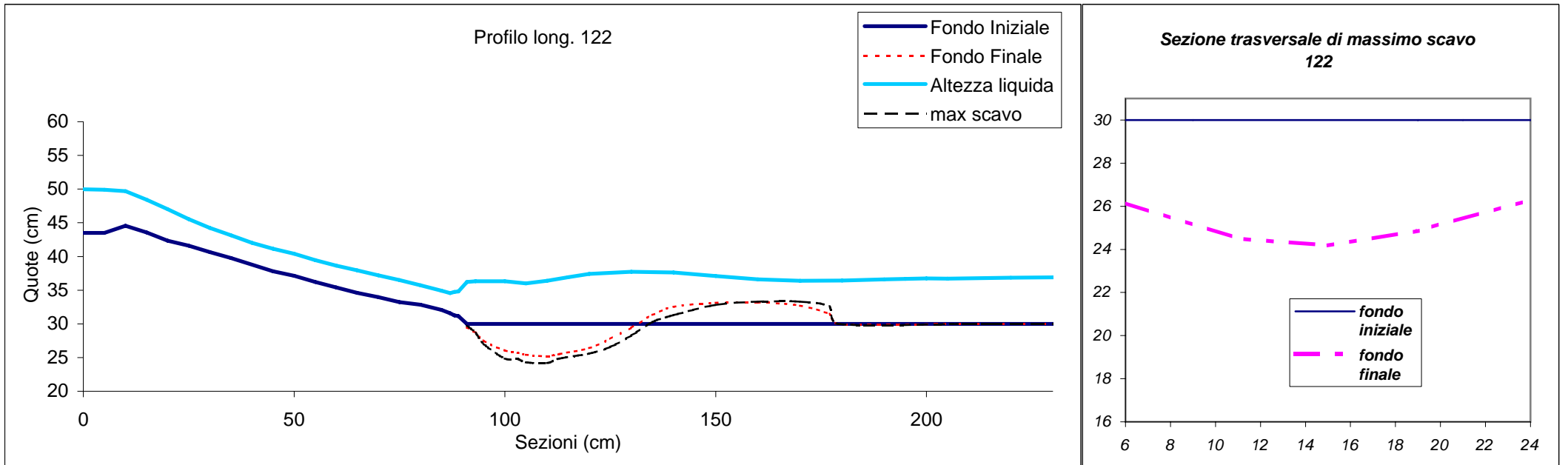
	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
120	3,8	1,8	0,167	A4	12,5	80	22,5	120	M1	1,2	7,05	5,47	2,7086	2,1016	2,6028	3,45	1,17	2,31144	3,8343	3,378	26	39,13	15	100	50	3	1,3255	4,015970267

[illegible]

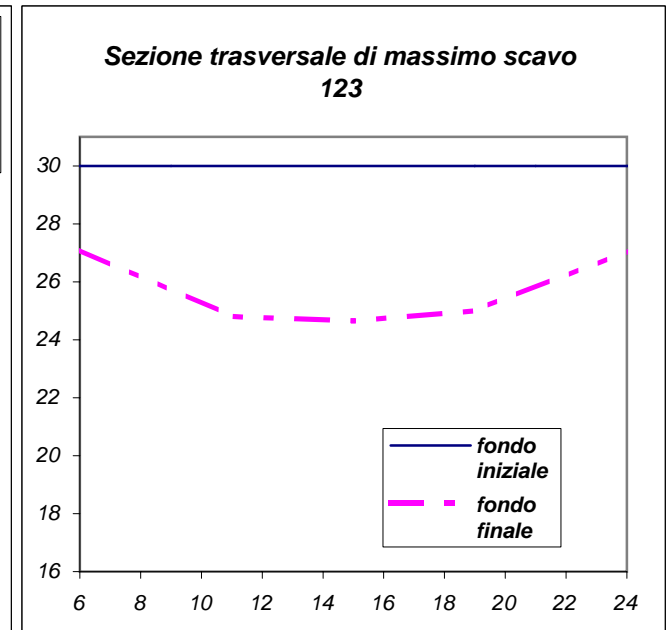
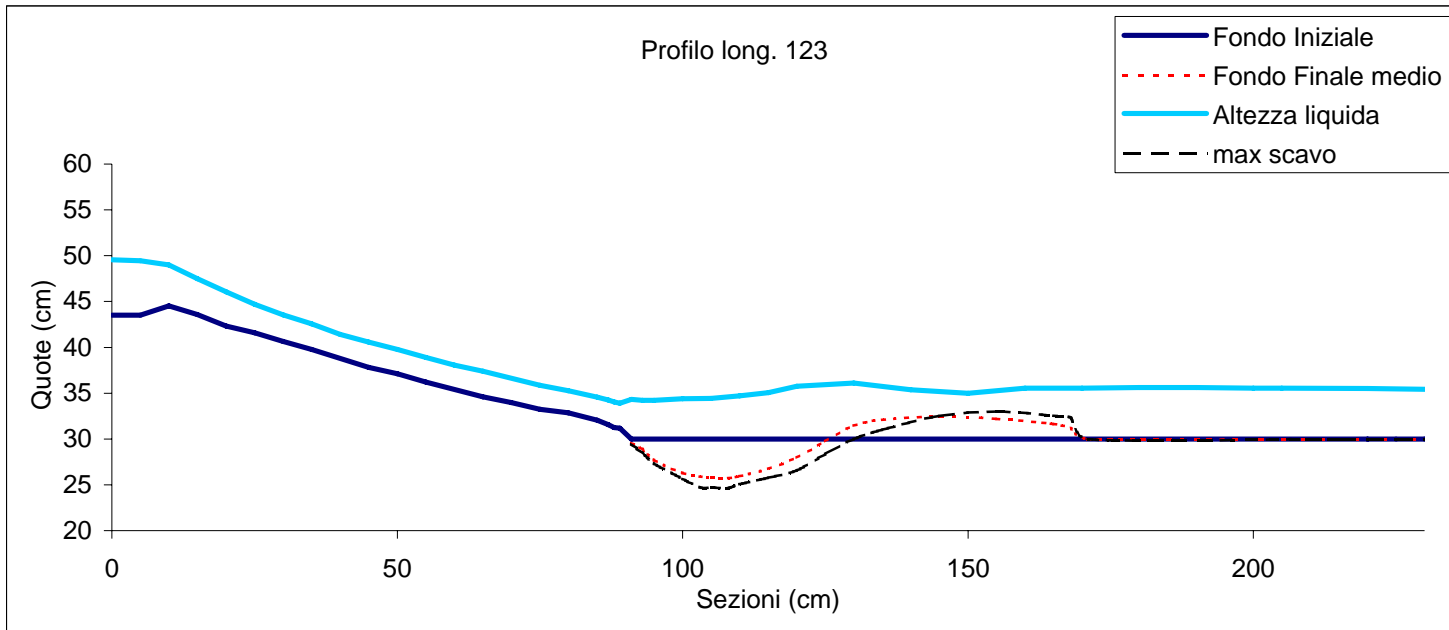
	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova																												calcolato
121	2,55	1,8	0,167	A4	12,5	80	22,5	120	M1	1,2	4,51	3,26	2,5418	1,83731	1,87	3,01	1,15	2,75577	3,7744	3,325	23	24,51	10	57	40	0,7	1,6964	3,992093879

[illegible]

	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova	calcolato																											
122	4,925	1,8	0,167	A4	12,5	80	22,5	120	M1	1,2	5,82	4,8	1,6014	1,32074	3,6343	6,717	1,08	1,81562	3,5589	3,135	32	41,5	20	89	70	3,6	1,8481	3,90743186

[illegible]

	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)
prova	calcolato																											
123	3,765	1,8	0,167	A4	12,5	80	22,5	120	M1	1,2	5,35	4,28	1,9638	1,57103	2,7243	5,548	1,11	2,1386	3,6295	3,197	24	35,73	18	81	55	3	2,0364	3,934952627

[illegible]

[illegible]

Profilo long. 125

Quote (cm)

Sezioni (cm)

Legend:

- Fondo Iniziale (Solid dark blue line)
- Fondo Finale (Dashed red line)
- Altezza liquida (Solid cyan line)
- max scavo (Dashed black line)

Sezione trasversale di massimo scavo 125

Quote (cm)

Sezioni (cm)

Legend:

- fondo iniziale (Solid dark blue line)
- fondo finale (Dashed magenta line)

[illegible]

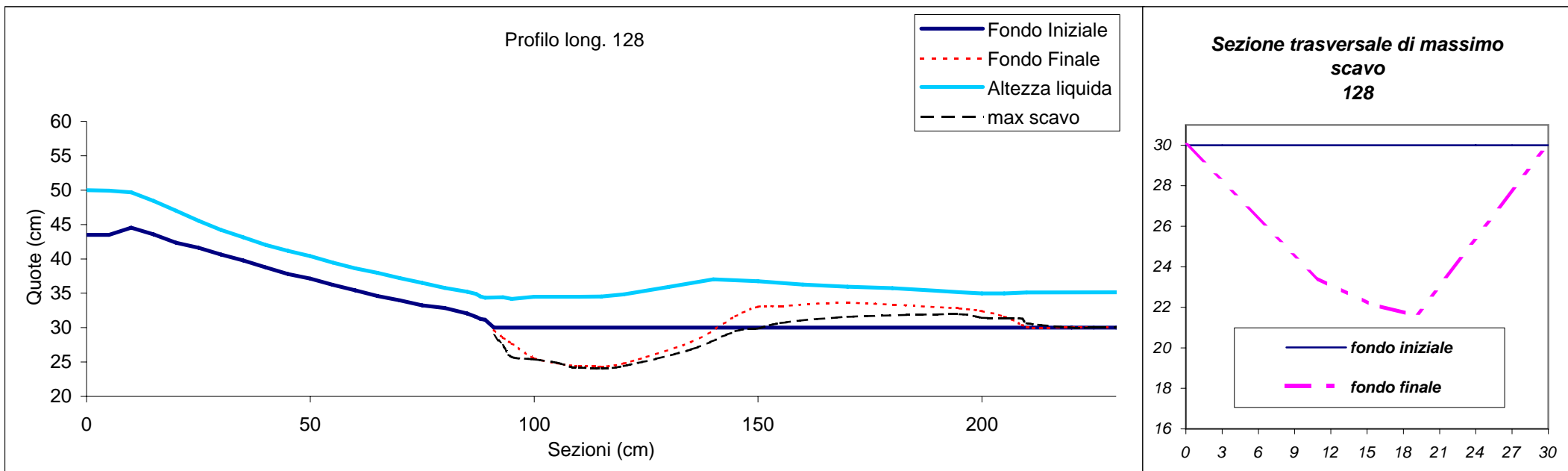
	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)		
prova																											calcolato		
126	3,765	1,8	0,167	A4		12,5	80	22,5	120	M1	1,2	6,3	5,15	2,3406	1,91331	2,6917	4,038	1,12	2,17765	3,6735	3,236	31	35,66	15	89	55	2,45	1,5003	3,952236959

[illegible]

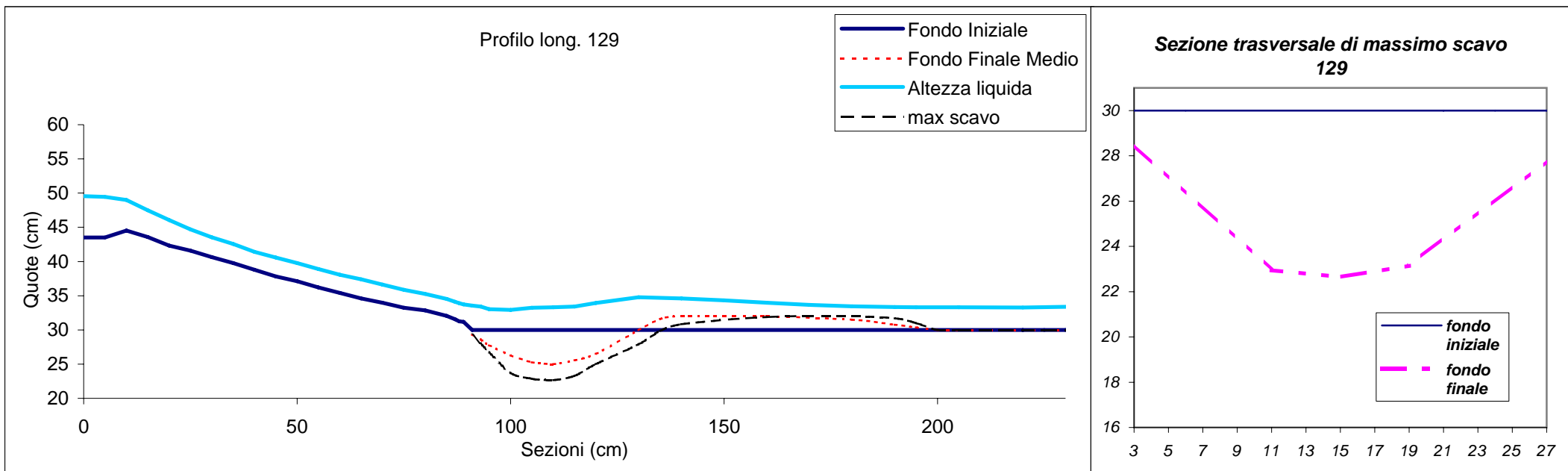
	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)		
prova																											calcolato		
127	2,565	1,8	0,167	A4		12,5	80	22,5	120	M1	1,2	3,25	1,97	1,6242	0,98451	2,001	4,55	1,03	2,31458	3,3665	2,966	22	19,69	9	45	30	1,18	2,0223	3,833325717

[illegible]

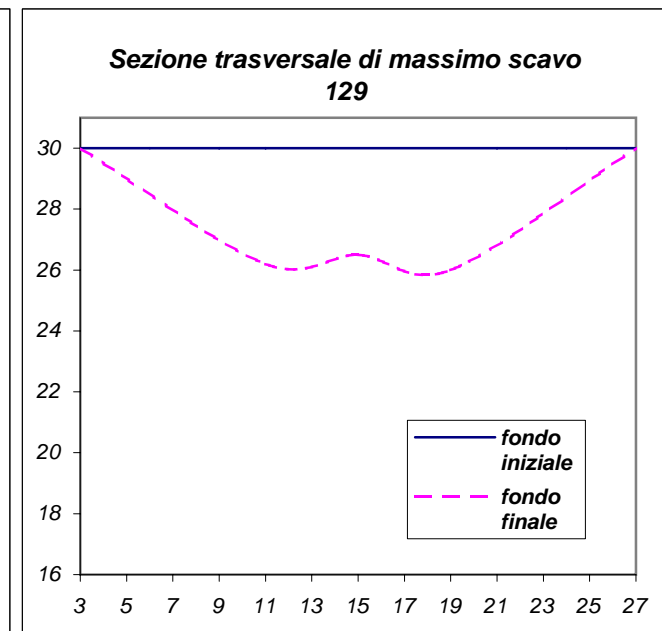
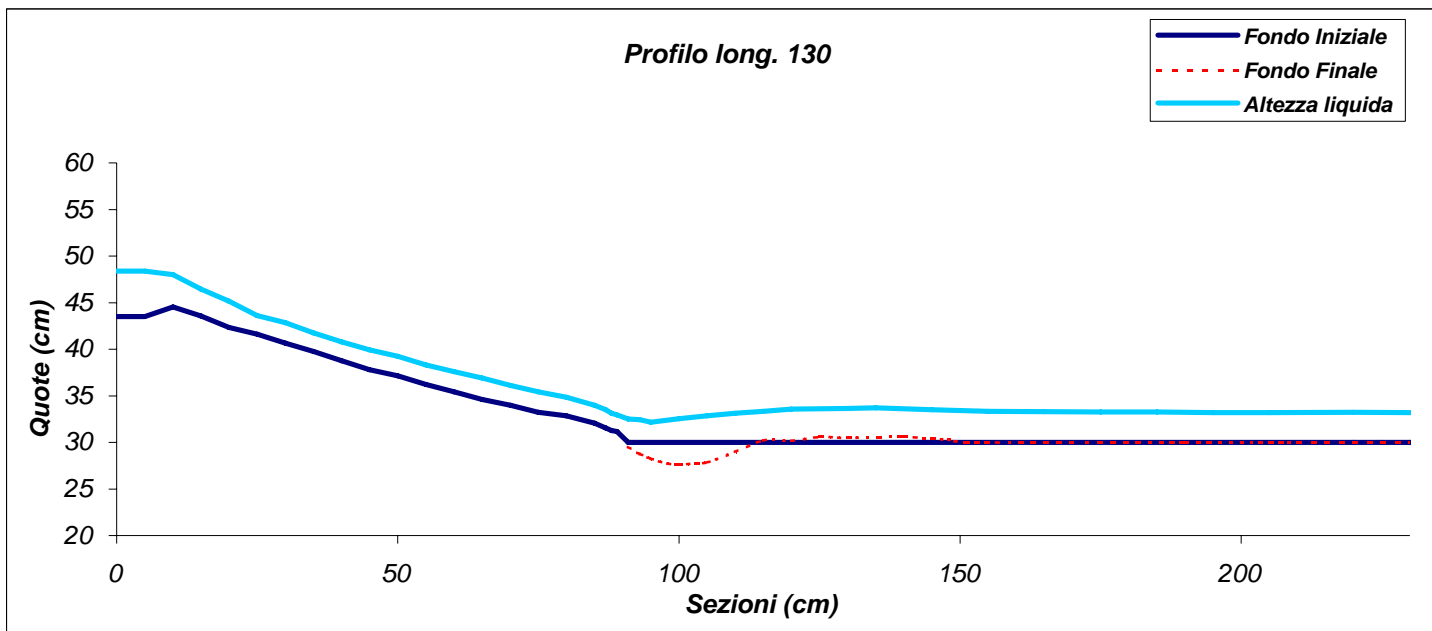
Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)		
prova																									calcolato			
128	4,95	2,8	0,167	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	7,85	5,62	2,4575	1,75937	3,1943	5,1	1,24	2,21457	4,0697	3,585	30	50,62	20	120	80	4,18	1,5966	4,334812464

[illegible]

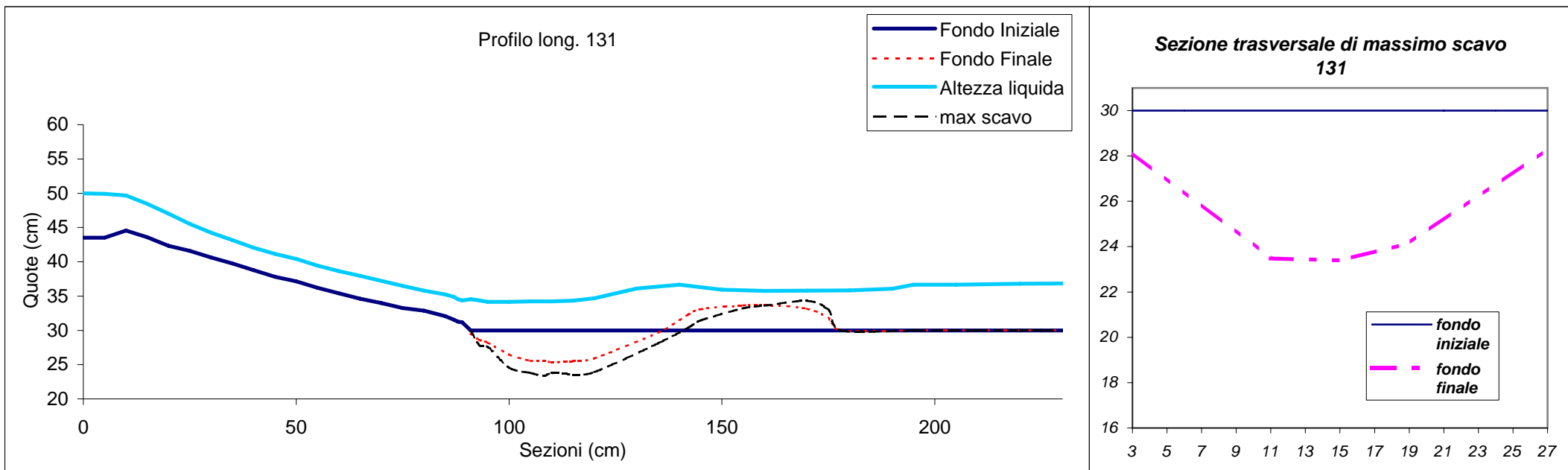
Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)		
prova																									calcolato			
129	3,75	2,8	0,167	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	7,35	4,99	2,8775	1,95354	2,5543	3,31	1,17	2,34623	3,8556	3,396	25	40,13	20	110	50	3,1	1,2958	4,261694066

[illegible]

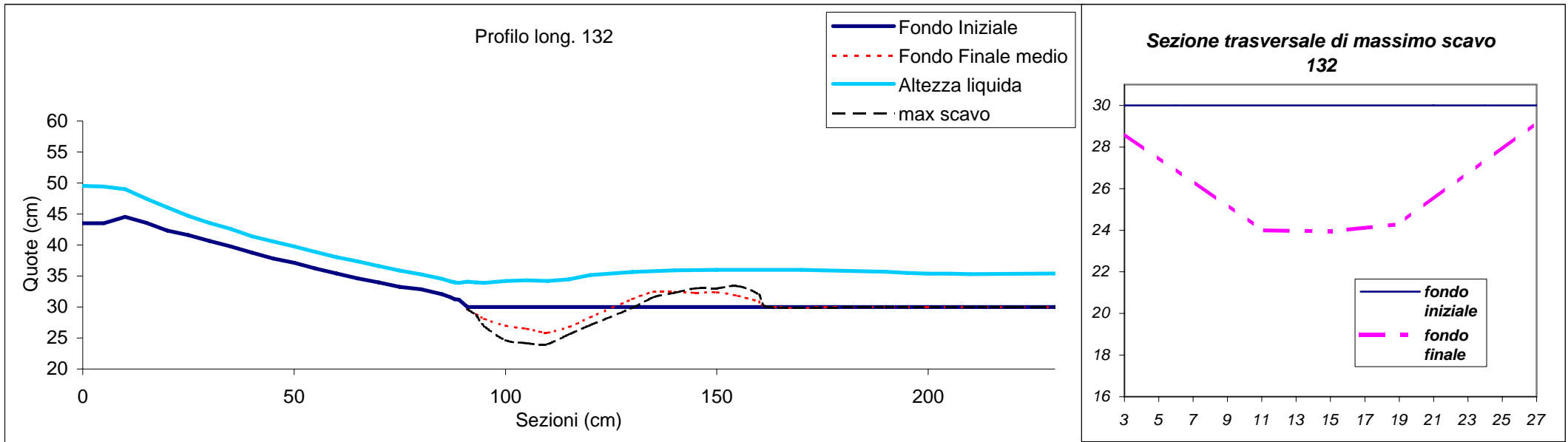
Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)		
prova																									calcolato			
130	2,55	2,8	0,167	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	4,41	2,27	2,4854	1,27935	1,7743	3,2	1,15	2,75577	3,7744	3,325	19	24,21	8	61	35	1,15	1,8035	4,234274075

[illegible]

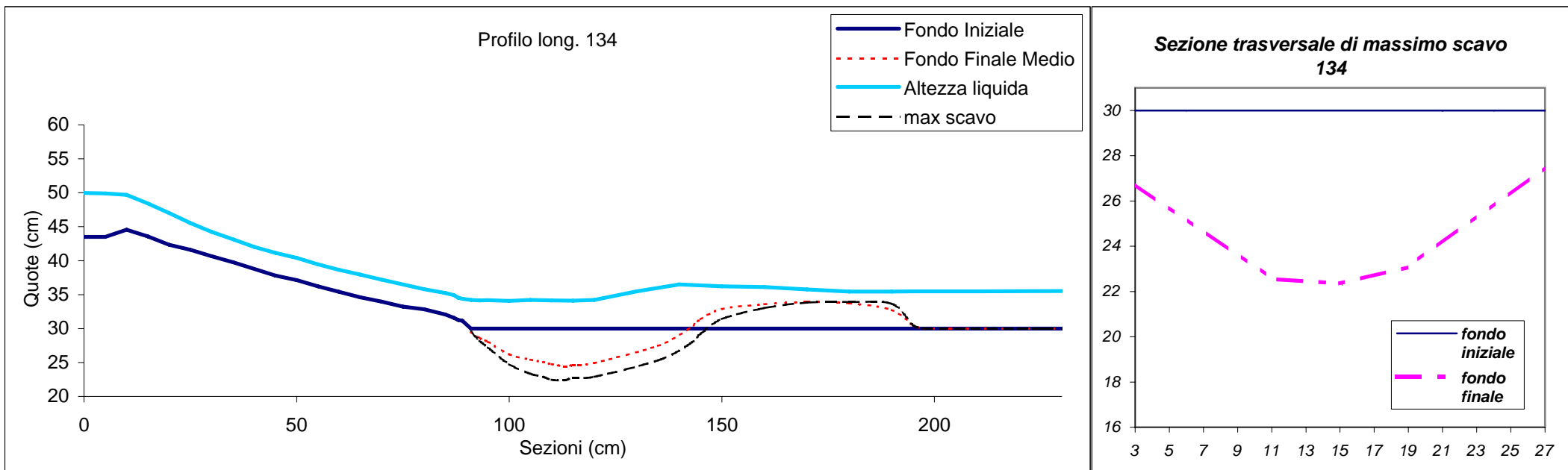
Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)		
prova																									calcolato			
131	4,95	2,8	0,167	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	6,61	4,5	2,0628	1,40435	3,2043	6,663	1,24	2,20422	4,057	3,574	35	45,88	18	88	70	4,25	2,0795	4,330440373

[illegible]

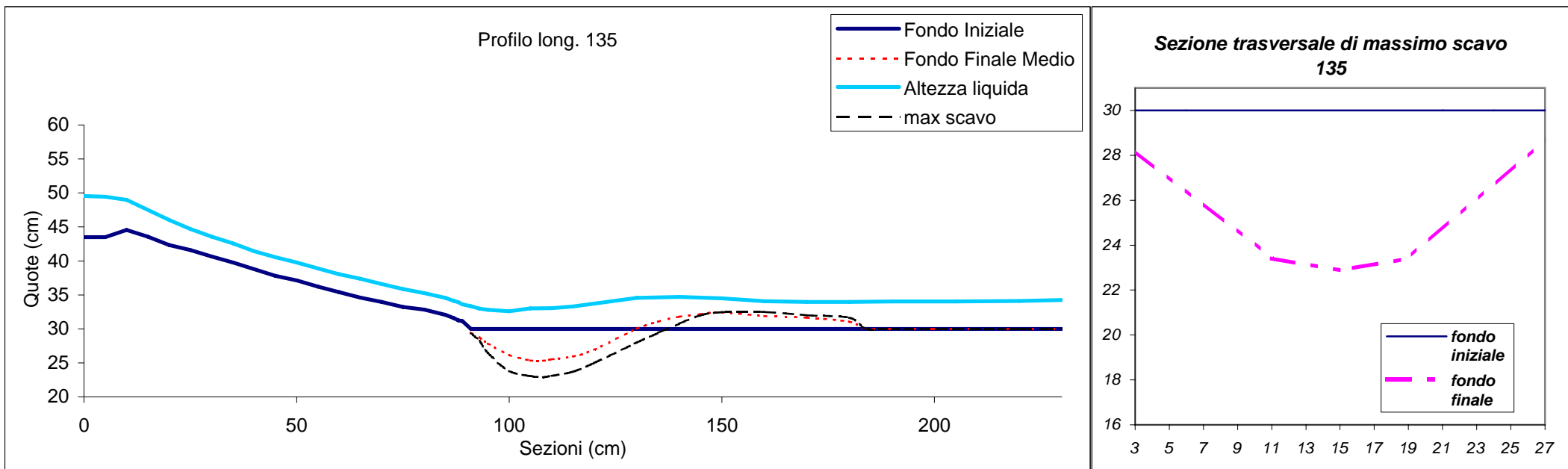
Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)		
prova																								calcolato				
132	3,75	2,8	0,167	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	6,05	3,98	2,2289	1,46629	2,7143	5,378	1,11	2,14186	3,6283	3,196	28	35,75	18	72	50	2,95	1,9815	4,185428551

[illegible]

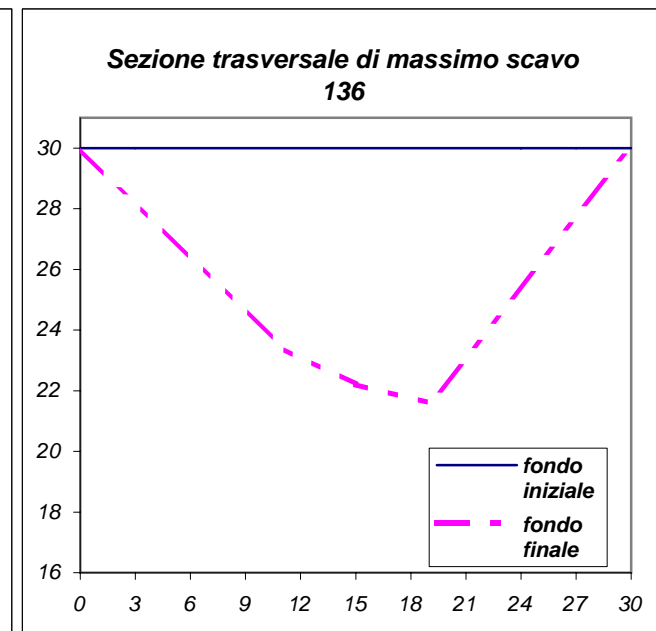
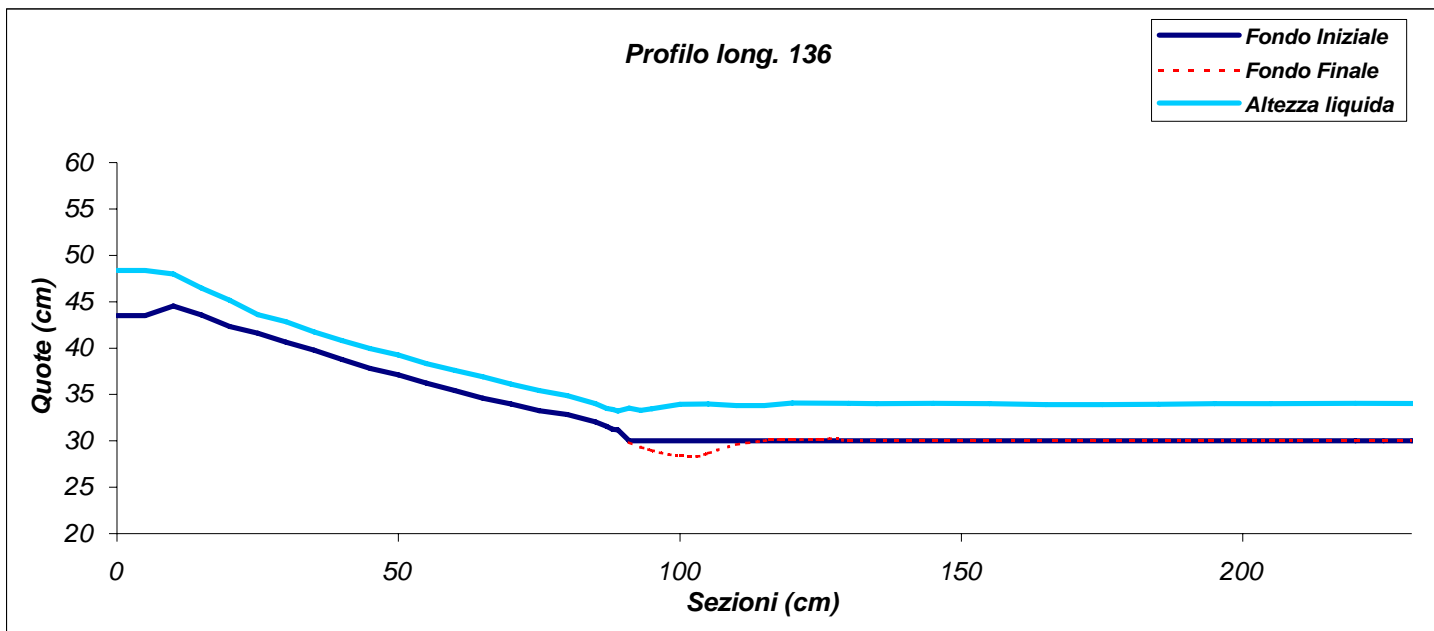
Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)		
prova																									calcolato			
134	4,95	2,8	0,167	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	7,65	5,55	2,3874	1,73203	3,2043	5,487	1,24	2,20422	4,057	3,574	26	52,28	23	108	80	4,1	1,7123	4,330440373

[illegible]

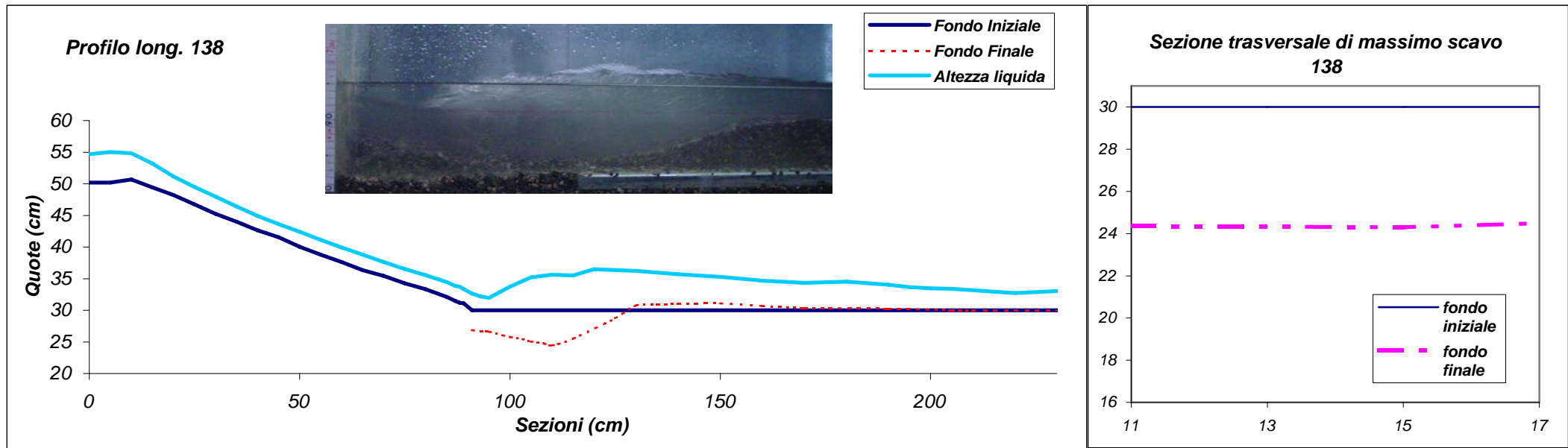
Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)		
prova																									calcolato			
135	3,75	2,8	0,167	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	7,12	4,68	2,9288	1,92513	2,431	4,033	1,23	2,52702	4,0512	3,569	22	39,88	18	94	60	2,88	1,6591	4,328445623

[illegible]

Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0/h1)		
prova																									calcolato			
136	2,55	2,8	0,167	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	3,15	1,68	1,5383	0,82045	2,0477	4	1	2,22283	3,2705	2,881	31	24,91	13	40	38	0,75	1,9534	4,068122485

[illegible]

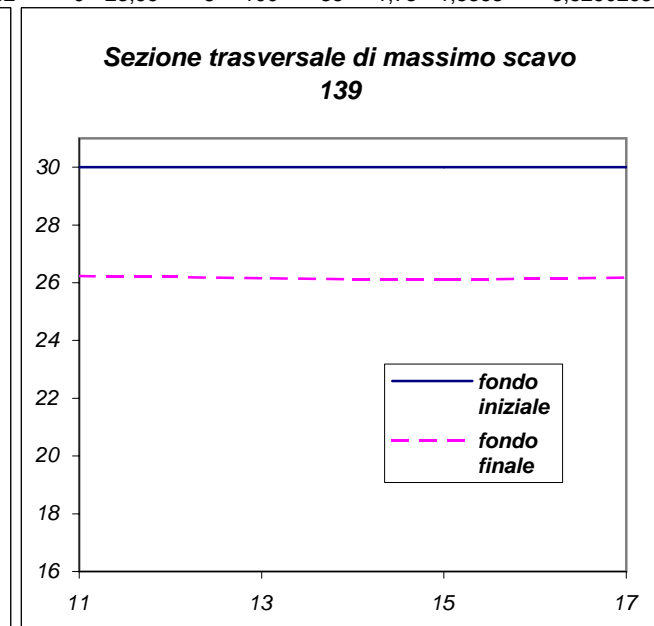
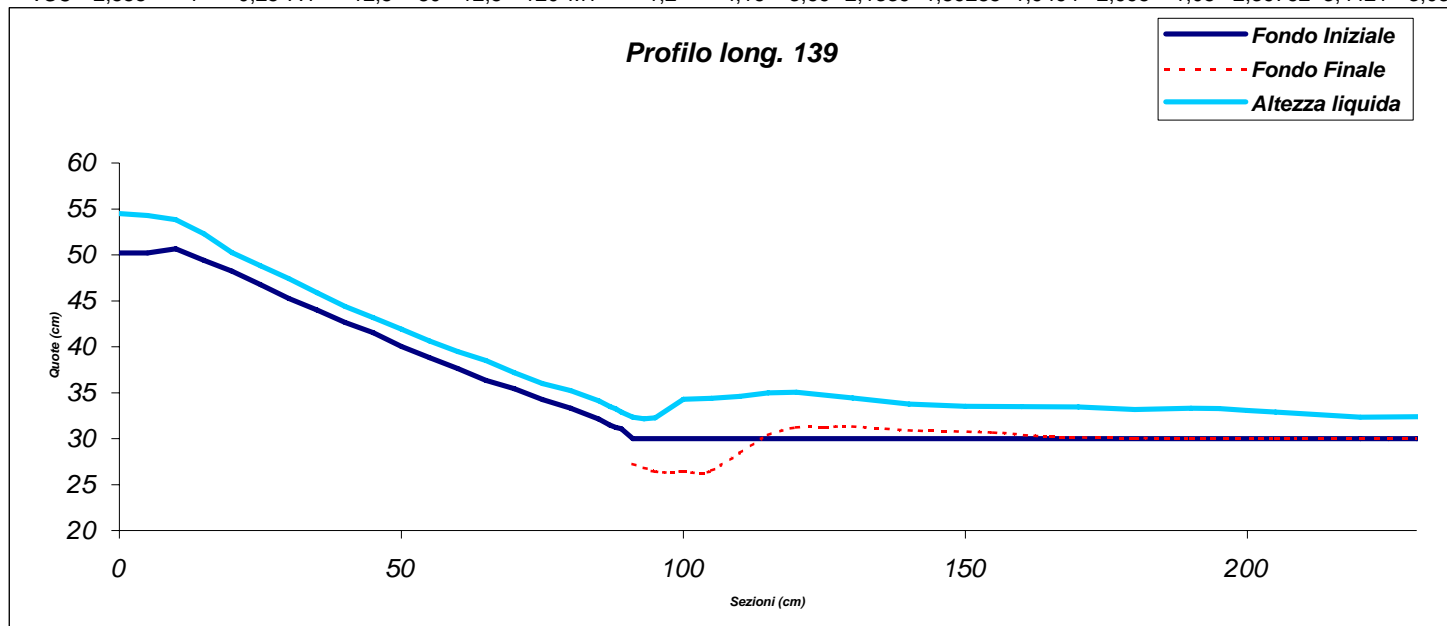
prova	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1 (zmax+h0)/h1)	calcolato
138	3,75	1	0,25	A4	12,5	80	12,5	120	M1	1,2	5,7	5,56	2,3811	2,32258	2,3939	3,308	1,25	2,58601	4,114	3,624	0	38,19	20	115	60	1,5	1,382	3,629660755



X	91	93	95	100	103	105	108	110	115	125	130	135	140	150	160	170	190	205	210
0																			
3																			
6																			
9																			
11	26	26,13	27	25,5	25	25	24,7	24,4	25,7	28,85	31	31,25	31,22	31,5	31	30,7			
13																			
15	27	26,5	26	25,7	26	25,2	24,8	24,3	25,5	28,4	30,5	30,75	30,9	31	30,75	30,4			
17																			
19	28	27,35	27	26,2	25	25,1	24,9	24,7	25,4	28,85	30,7	30,7	30,8	30,8	30,3	30,2			
21																			
24																			
27																			
30																			



prova	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1 (zmax+h0)/h1	calcolato
139	2,555	1	0,25	A4	12,5	80	12,5	120	M1	1,2	4,16	3,69	2,1339	1,89285	1,9494	2,995	1,05	2,39762	3,4421	3,032	0	23,99	8	100	35	1,73	1,5363	3,529029567



X	91	93	95	98	100	103	105	110	115	120	125	130	140	155	165	180	190	205
0																		
3																		
6																		
9																		
11	27	26,6	26	25,8	26	26,2	26,7	28,7	30,6	31,55	31,3	31,1	30,78	30,75	30,31	30,1	30	30
13																		
15	27	26,89	26	25,9	27	26,1	26,4	28,4	30,7	31,48	31,2	31,73	30,82	30,7	30	30	30	30
17																		
19	28	27	27	27,2	27	26,3	26,5	28,2	29,9	30,68	31,3	31,13	31,1	30,52	30,3	30,1	30	30
21																		
24																		
27																		
30																		



Profilo long. 140

Legend:

- Fondo Iniziale (Solid dark blue line)
- Fondo Finale (Dashed red line)
- Altezza liquida (Solid cyan line)

Y-axis: Quote (cm) (20 to 60)

X-axis: Sezioni (cm) (0 to 200)

Sezione trasversale di massimo scavo 140

Legend:

- fondo iniziale (Solid dark blue line)
- fondo finale (Dashed magenta line)

Y-axis: Depth (cm) (16 to 30)

X-axis: Distance from wall (cm) (11 to 19)

[illegible]

Profilo long. 142

Quote (cm)

Sezioni (cm)

Fondo Iniziale
Fondo Finale
Altezza liquida

Sezione trasversale di massimo scavo 142

Quote (cm)

Sezioni (cm)

fondo iniziale
fondo finale

[illegible]

Profilo long. 143

Legend:

- Fondo Iniziale (Solid dark blue line)
- Fondo Finale (Dashed red line)
- Altezza liquida (Solid cyan line)

Sezioni (cm)	Fondo Iniziale (cm)	Fondo Finale (cm)	Altezza liquida (cm)
0	50	-	54
15	50.5	-	53.5
30	48	-	50
45	44	-	45
60	40	-	40
75	36	-	35
90	32	-	32
95	30	28	31.5
105	30	26	33
115	30	30	35
130	30	31	33
150	30	30	33
175	30	30	33.5
200	30	30	33
225	30	30	32
230	30	30	32.5

Sezione trasversale di massimo scavo 143

Legend:

- fondo iniziale (Solid dark blue line)
- fondo finale (Dashed magenta line)

Distanza (cm)	fondo iniziale (cm)	fondo finale (cm)
11	30	26
13	30	26.2
15	30	26.5
17	30	27
19	30	27.5

[illegible]

Profilo long.144

Quote (cm)

Sezioni (cm)

Fondo Iniziale
Fondo Finale
Altezza liquida

Sezione trasversale di massimo scavo 144

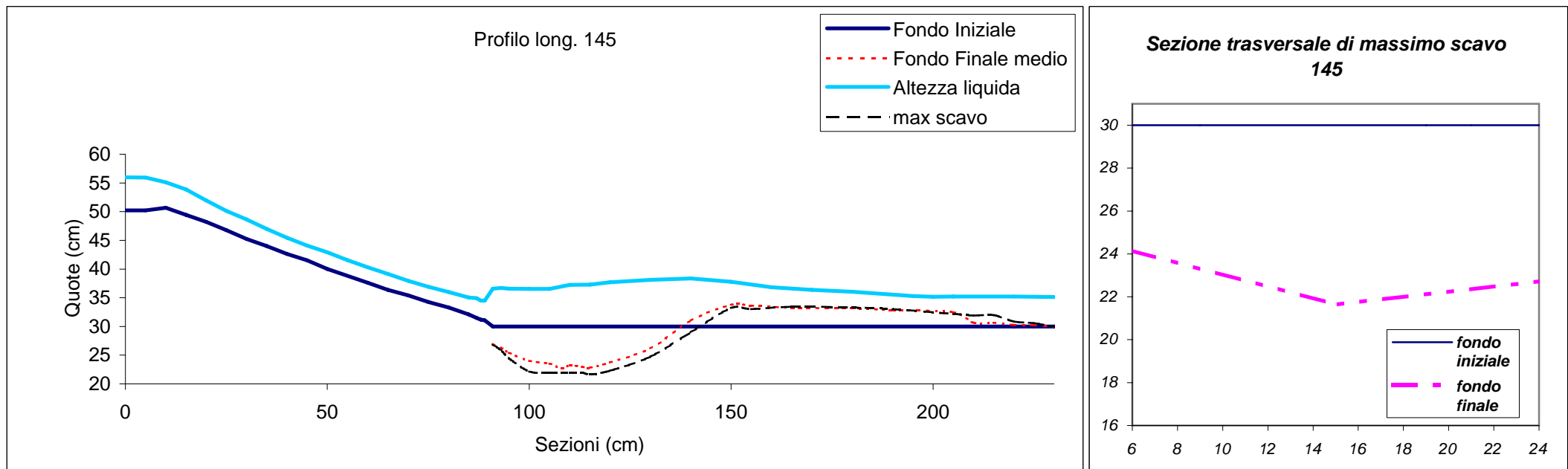
Quote (cm)

Sezioni (cm)

fondo iniziale
fondo finale

[illegible]

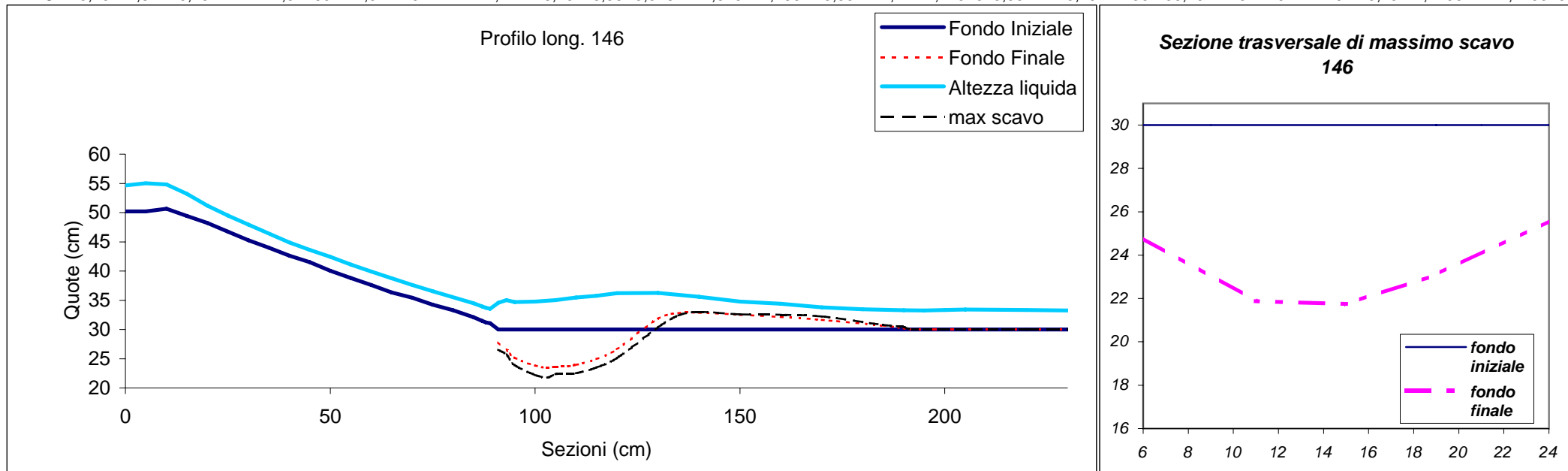
prova	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0)/h1
145	4,95	1,8	0,25	A4	12,5	80	22,5	120	M1	1,2	8,16	7,16	2,6323	2,30968	3,1	5,8	1,16	2,01532	3,8218	3,367	0	47,91	15	140	25	4,15	1,871	4,677887771



X	91	93	95	100	105	108	110	113	115	120	130	140	150	155	165	180	190	205	210	215	220	225	230
0																							
3																							
6	27	26,25	26	24,6	24	23,8	23,8	23,2	24,2	24,55	27,4	32,28	34,15	33,8	33,11	33	32,87	32,67	30	30	30	30	30
9																							
11																							
13																							
15	27	25,85	24	22,2	22	21,9	21,9	22	21,6	22,29	24,7	28,99	33,22	33	33,42	33,3	33	32,2	31,9	32	30,85	30,6	30
17																							
19																							
21																							
24	27	26,85	26	25,3	25	22,4	24	23,8	22,7	24,4	26,5	31,75	33,94	34,12	33,21	33,2	32,66	32,5	30	30	30	30	30
27																							
30																							



	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0)/h1)
prova																												calcolato
146	3,75	1,8	0,25	A4	12,5	80	22,5	120	M1	1,2	8,25	6,58	3,3184	2,6467	2,4861	3,532	1,21	2,44346	3,9614	3,49	36	36,49	13	102	40	3,75	1,4206	4,743329516



X	91	93	95	100	103	105	108	110	115	120	130	135	140	150	160	170	185	190	192
0																			
3																			
6	30	27	27	25,2	25	24,9	25	25,8	27	28,91	33,8	33,25	32,1	31,75	31,2	31	30,3	30	30
9																			30
11	26	24,95	24	22,7	22	22,5	22,6	22,7	24,4	26,53	31,4	32,5	33,11	32,8	32,4	31,8	30,9	30,5	30
13																			30
15	27	25,69	24	22,2	22	22,4	22,4	22,5	23,5	25,1	30,4	32,38	33	32,6	32,5	32,2	30,8	30,45	30
17																			30
19	27	26,5	25	23,5	23	22,7	22,8	22,9	23,6	25,2	30,6	32,5	33,1	32,9	32,6	32	30,88	30,11	30
21																			30
24	30	28,44	27	25,7	26	25,7	25,7	25,8	26,2	27,3	33	33,45	33,08	32,6	32	31,2	30,45	30	30
27																			
30																			

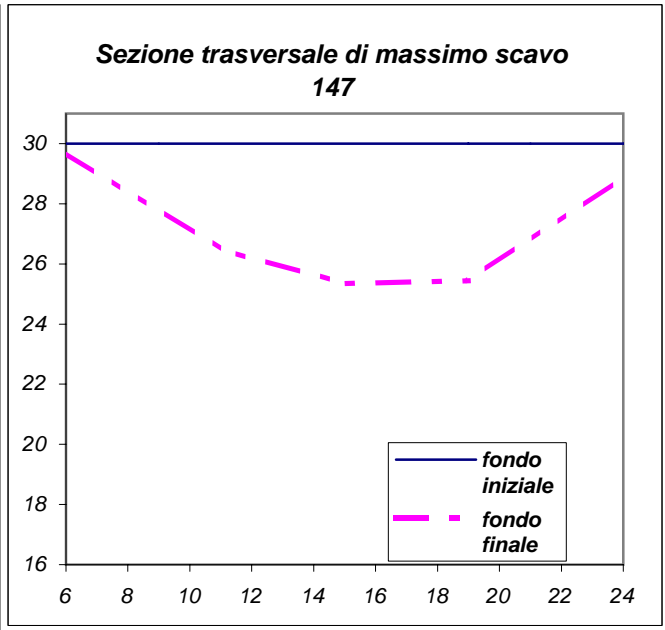


Profilo long. 147

Legend:

- Fondo Iniziale** (Solid dark blue line)
- Fondo Finale medio** (Dashed red line)
- Altezza liquida** (Solid light blue line)
- max scavo** (Dash-dot black line)

The graph displays the longitudinal profile of a road section. The 'Fondo Iniziale' and 'Fondo Finale medio' lines show a significant drop in elevation between sections 50 and 100, reaching a minimum around section 100 before leveling off. The 'Altezza liquida' line remains consistently higher than the 'Fondo' lines, showing a similar downward trend but leveling off at a higher elevation. The 'max scavo' line follows the 'Fondo Iniziale' closely, indicating the maximum depth of excavation required to achieve the final profile.

[illegible]

Profilo long. 148

Quota (cm)

Sezioni (cm)

Legend:

- Fondo Iniziale (Solid dark blue line)
- Fondo Finale medio (Dashed red line)
- Altezza liquida (Solid cyan line)
- scavo max (Dashed black line)

Sezione trasversale di massimo scavo 148

Quota (cm)

Sezioni (cm)

Legend:

- fondo iniziale (Solid dark blue line)
- fondo finale (Dashed magenta line)

[illegible]

[illegible]

Profilo long. 150

Quote (cm)

Sezioni (cm)

Legend:

- Fondo Iniziale (Solid dark blue line)
- Fondo Finale medio (Dashed red line)
- Altezza liquida (Solid cyan line)
- max scavo (Dashed black line)

Sezione trasversale di massimo scavo 150

Quote (cm)

Sezioni (cm)

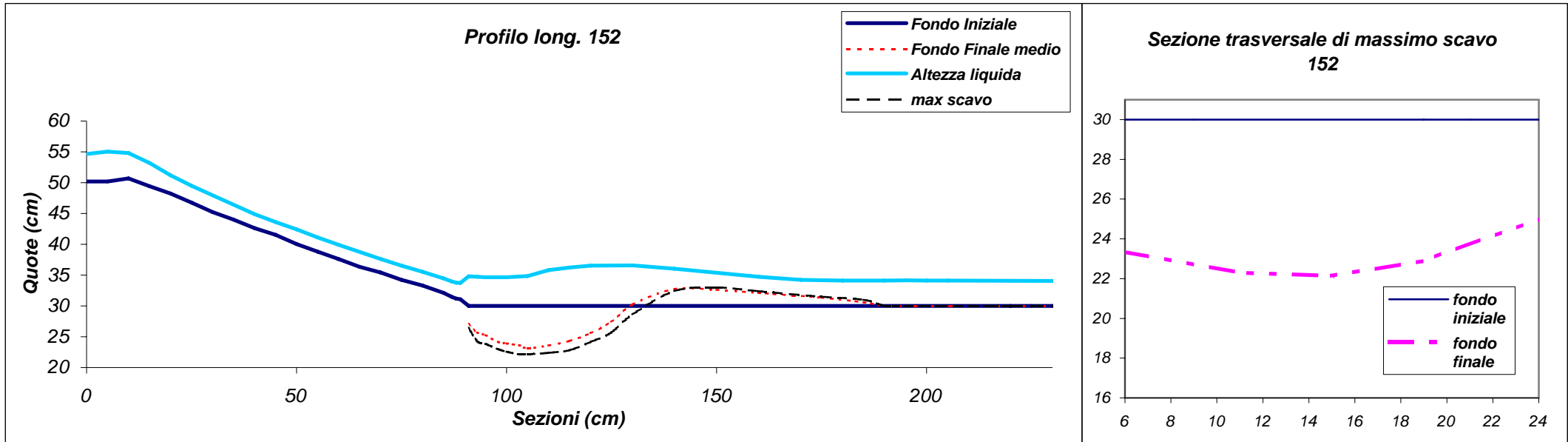
Legend:

- fondo iniziale (Solid dark blue line)
- fondo finale (Dashed magenta line)

[illegible]

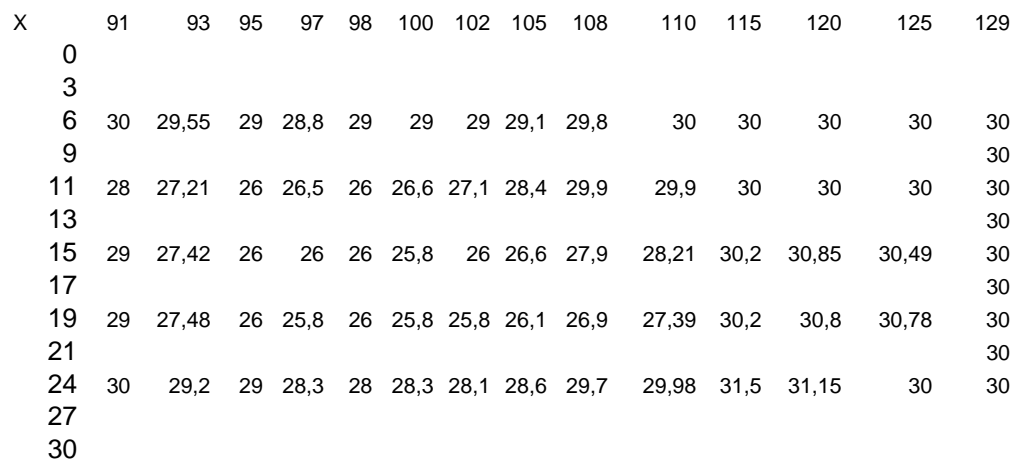
The figure consists of two line graphs. The left graph, titled "Profilo long. 151", plots "Quote (cm)" (Elevations in cm) on the y-axis (ranging from 20 to 60) against "Sezioni (cm)" (Sections in cm) on the x-axis (ranging from 0 to 200). It shows four data series: "Fondo Iniziale" (Initial Bottom) as a solid dark blue line, "Altezza liquida" (Liquid Height) as a solid cyan line, "max scavo" (Maximum Excavation) as a dashed black line, and "scavo medio" (Average Excavation) as a dashed red line. The right graph, titled "Sezione trasversale di massimo scavo 151", plots elevation on the y-axis (ranging from 16 to 30) against distance on the x-axis (ranging from 6 to 24). It shows two data series: "fondo iniziale" (Initial Bottom) as a solid dark blue line and "fondo finale" (Final Bottom) as a dashed magenta line.

[illegible]

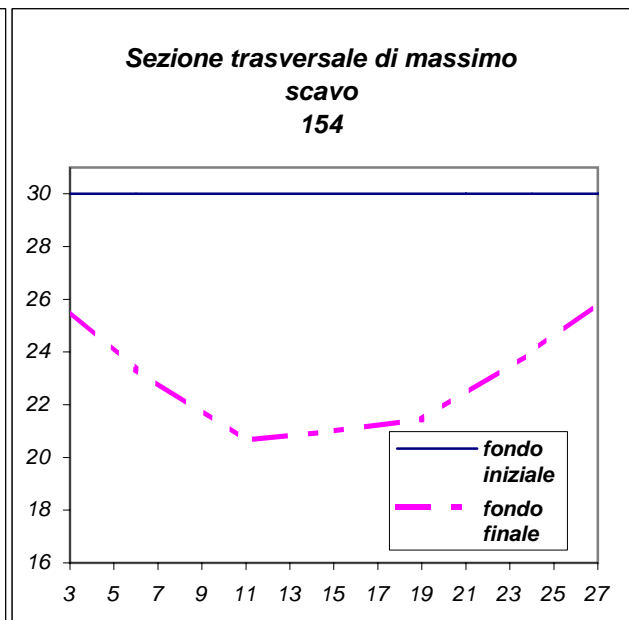
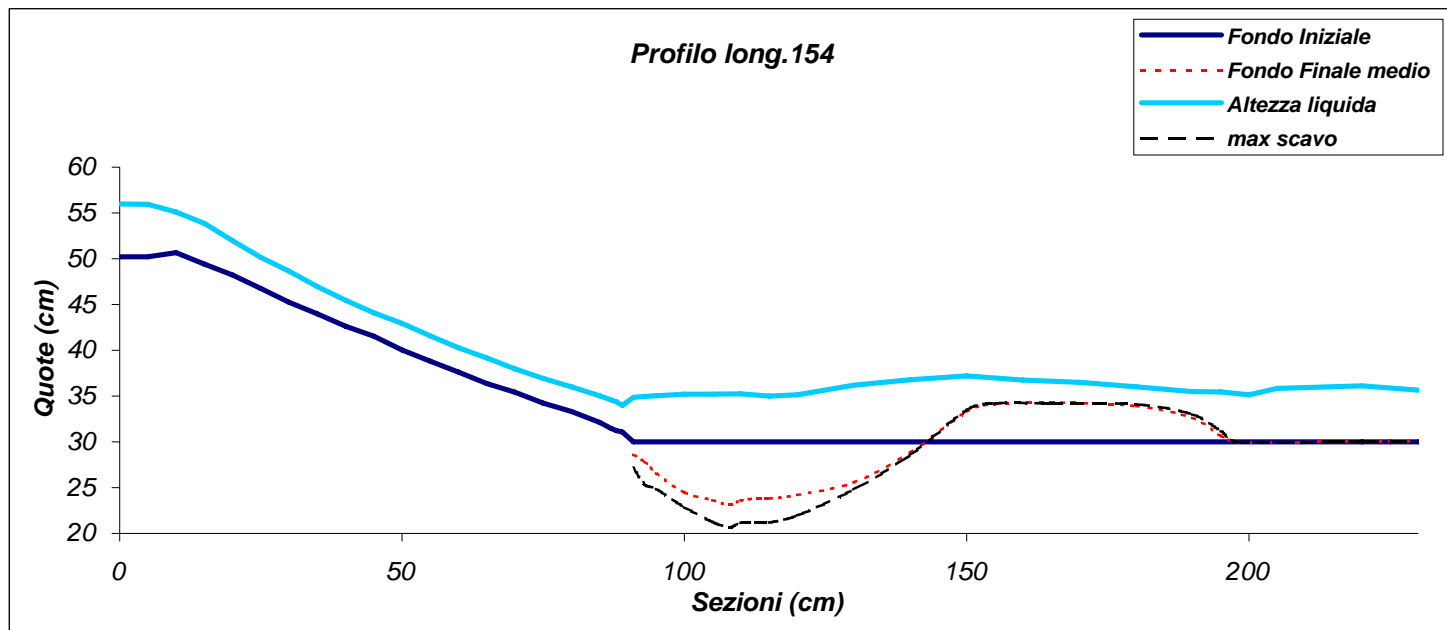


Profilo long. 153

Sezioni (cm)	Fondo Iniziale (cm)	Fondo Finale medio (cm)	Altezza liquida (cm)	max scavo (cm)
0	50.0	50.0	54.0	50.0
15	50.5	50.5	53.5	50.5
30	48.0	48.0	50.0	48.0
45	44.0	44.0	45.0	44.0
60	40.0	40.0	41.0	40.0
75	36.0	36.0	37.0	36.0
90	30.0	30.0	33.0	30.0
105	30.0	27.0	33.0	25.0
120	30.0	30.0	34.0	30.0
135	30.0	30.0	34.0	30.0
150	30.0	30.0	34.0	30.0
165	30.0	30.0	34.0	30.0
180	30.0	30.0	34.0	30.0
195	30.0	30.0	34.0	30.0
210	30.0	30.0	34.0	30.0
225	30.0	30.0	34.0	30.0



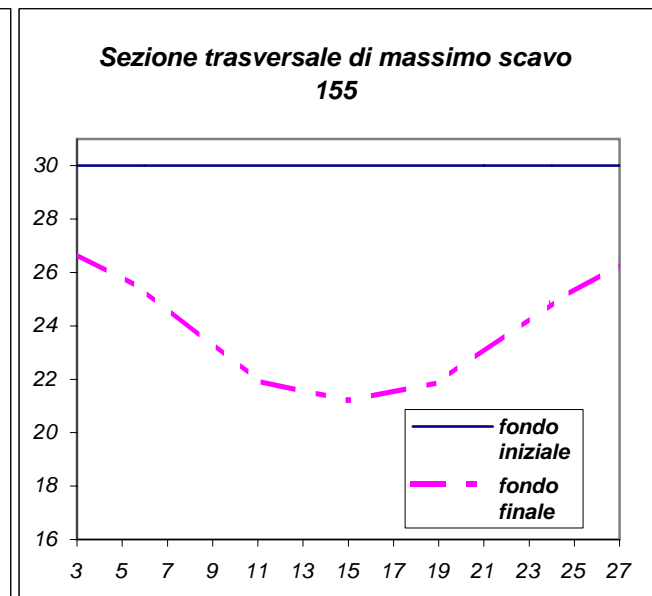
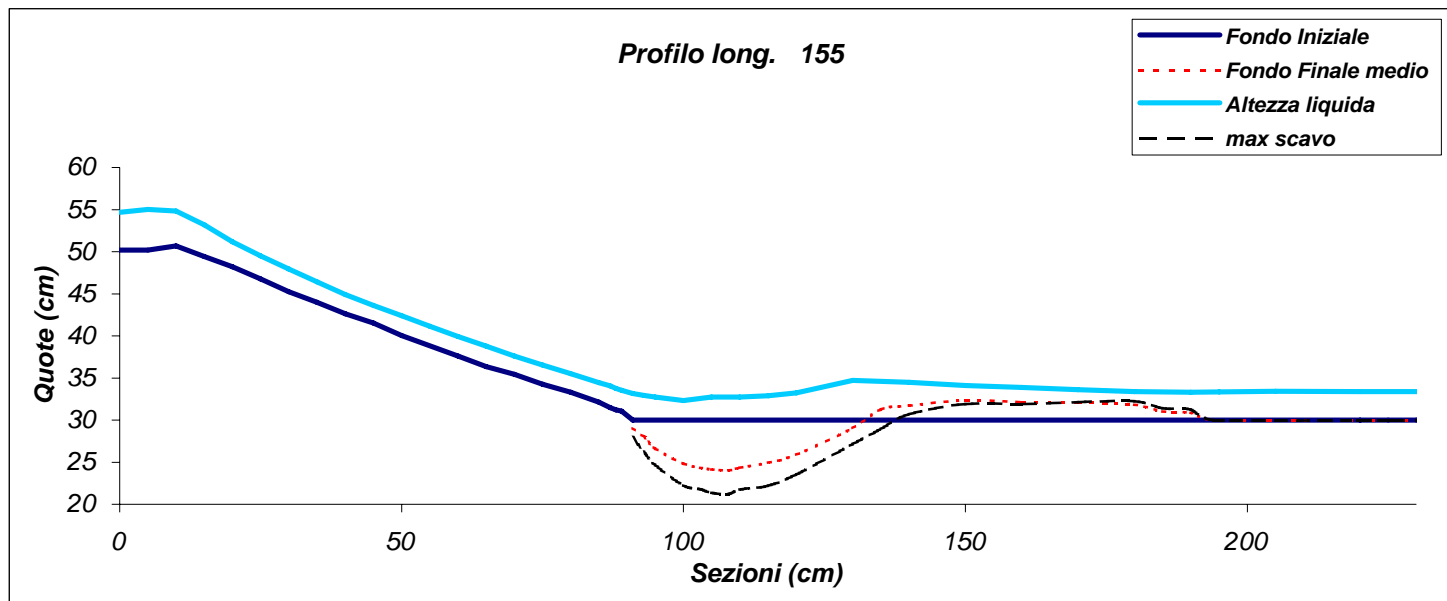
prova	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1 (zmax+h0)/h1	calcolato
154	4,95	2,8	0,25	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	9,35	6,74	3,0506	2,19902	3,065	6,15	1,29	2,35622	4,2414	3,736	35	52,65	18	60	60	4,9	2,0065	5,125022494



X	91	93	95	100	105	108	110	113	115	120	130	140	150	155	165	180	190	195	198
0																			
3	30	30	28	26,4	26	25,6	25,8	25,8	26	26,4								30	30
6	29	28,15	27	24,9	24	23,4	23,5	24,2	24,2	24,92	27,3	31,06	34,9	34,82	34,45	33,2	31,52	30	30
9																			30
11	27	25,35	25	22,9	21	20,7	21,2	21,2	21,2	21,95	24,8	28,56	33,45	34,21	34,21	34,1	33	31,2	30
13																			30
15	28	26,54	25	22,8	21	21	21,3	21,3	21,4	21,65	24,8	27,98	32,58	33,85	34,22	33,9	32,89	31,66	30
17																			30
19	27	26,4	25	23,2	22	21,4	22	22	21,7	22,38	24,5	27,59	32,21	33,74	34,19	34,1	32,83	31,28	30
21																			30
24	29	28,42	27	25,2	25	24	24,8	25,7	25,4	25,11	26,5	28,9	33,23	33,95	34,4	34,2	32,81	30,5	30
27	30	30	29	26,1	26	25,9	26,8	26,8	26,9	26,84								30	30
30																			



	Q	λ	i	mr	b	lr	lb	lbd	Mb	σ	zmax	zm	Zmax	Zmmis.	h1	h0	U	Froude	Fd50	Fd90	ang	lo	Xm	Lf	XM	hd	ho/h1	(zmax+h0)/h1)
prova																												calcolato
155	3,75	2,8	0,25	A4	12,5	80	35	120	M1	1,2	8,8	5,97	3,4821	2,36228	2,5272	3,395	1,19	2,38408	3,897	3,433	35	42,18	18	104	45	3,3	1,3434	4,986654204



X	91	93	95	100	103	105	108	110	115	120	130	135	140	150	160	170	180	185	190	194
0																				
3	30	30	29	27,8	27	26,7	26,7	26,6	27,1	27,89	31,2	33,3								
6	30	28,75	27	25,6	25	25,4	25,3	25,6	26,9	27,45	30,2	32,69	33,05	32,95	32,1	31,7	30,72	30,15	30	
9																				
11	27	25,89	25	22,4	22	22	21,9	22,5	23	24,65	28,2	30,69	31,75	32,56	32,12	32,3	31,85	31,05	30,54	
13																				
15	28	26,19	25	22,3	22	21,4	21,2	21,8	22,2	23,55	27,2	28,95	30,69	31,9	31,92	32,1	32,26	31,42	31,25	
17																				
19	28	26,49	25	22,9	22	22,2	21,9	22,3	22,6	23,41	27,1	29,46	30,89	31,85	32,15	32,1	32,2	31,4	31,5	
21																				
24	30	30	27	25,3	25	25	24,9	24,9	25,8	26,45	29,1	31,25	32,21	32,44	32,4	32,3	32,05	31,05	31	
27	30	28,75	29	27,5	27	26,5	26,3	26,6	27	27,75	30,3	32,4								
30																				

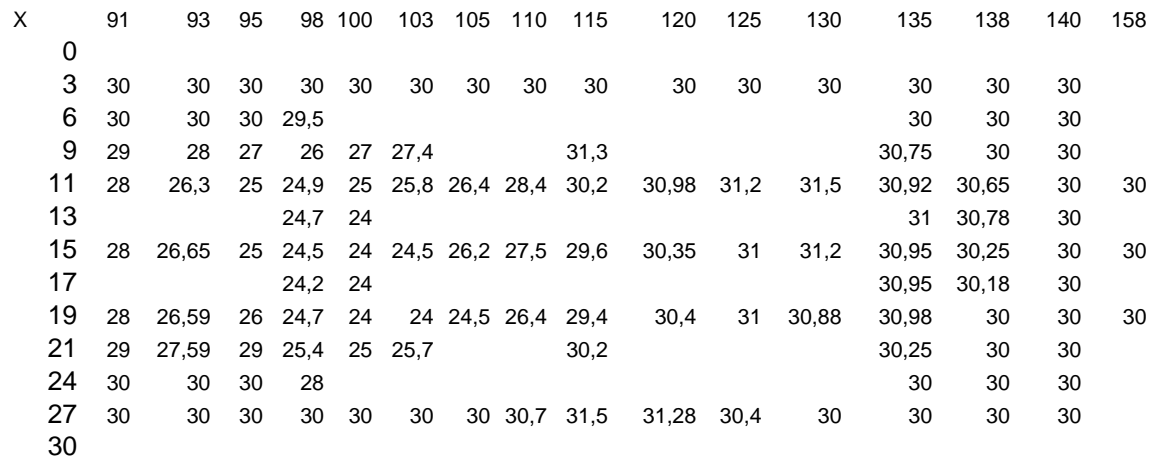


Profilo long.156

Legend:

- Fondo Iniziale (Solid dark blue line)
- Fondo Finale medio (Dashed red line)
- Altezza liquida (Solid cyan line)
- maxz scavo (Dashed black line)

The graph displays the elevation profile of a road section. The 'Altezza liquida' (liquid height) starts at approximately 54 cm and decreases to about 33 cm. The 'Fondo Iniziale' (initial base) starts at 50 cm and decreases to 30 cm. The 'Fondo Finale medio' (final base average) follows a similar path but with a slight dip around section 100. The 'maxz scavo' (maximum excavation) shows a significant dip to about 24 cm around section 100, indicating the required excavation depth at that point.



Profilo long. 157

Legend:

- Fondo Iniziale (Solid blue line)
- Fondo Finale medio (Dashed red line)
- Altezza liquida (Solid cyan line)
- max scavo (Dashed black line)

Sezione trasversale di massimo scavo 157

Legend:

- fondo iniziale (Solid blue line)
- fondo finale (Dashed magenta line)

[illegible]

Profilo long. 158

Quota (cm)

Sezioni (cm)

Legend:

- Fondo Iniziale
- Fondo Finale medio
- Altezza liquida
- max scavo

Sezione trasversale di massimo scavo 158

Quota (cm)

Sezioni (cm)

Legend:

- fondo iniziale
- fondo finale

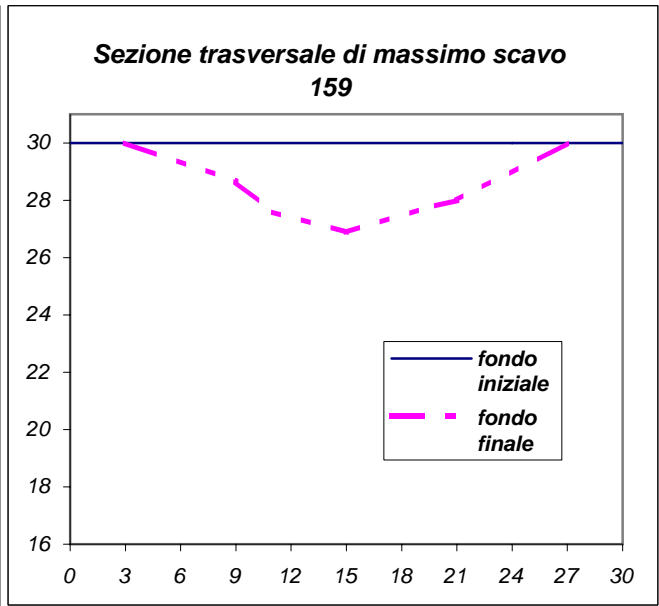
[illegible]

Profilo long. 159

Legend:

- Fondo Iniziale (Dark blue solid line)
- Fondo Finale medio (Red dashed line)
- Altezza liquida (Cyan solid line)
- max scavo (Black dashed line)

Sezioni (cm)	Fondo Iniziale (cm)	Fondo Finale medio (cm)	Altezza liquida (cm)	max scavo (cm)
0	50.0	50.0	54.0	50.0
15	50.5	50.5	53.5	50.5
30	48.0	48.0	50.0	48.0
45	44.0	44.0	46.0	44.0
60	40.0	40.0	42.0	40.0
75	36.0	36.0	38.0	36.0
90	32.0	32.0	34.0	32.0
100	30.0	28.5	34.5	27.0
110	30.0	29.5	34.5	28.0
120	30.0	30.0	34.5	30.0
130	30.0	30.0	35.0	30.0
140	30.0	30.0	35.0	30.0
150	30.0	30.0	35.0	30.0
160	30.0	30.0	35.0	30.0
170	30.0	30.0	35.0	30.0
180	30.0	30.0	35.0	30.0
190	30.0	30.0	35.0	30.0
200	30.0	30.0	35.0	30.0
210	30.0	30.0	35.0	30.0
225	30.0	30.0	35.0	30.0

[illegible]

Profilo long. 160

Legend:

- Fondo Iniziale (Solid dark blue line)
- Fondo Finale medio (Dashed red line)
- Altezza liquida (Solid cyan line)
- scavo max (Dashed black line)

Sezione trasversale di massimo scavo 160

Legend:

- fondo iniziale (Solid dark blue line)
- fondo finale (Dashed magenta line)

[illegible]

[illegible]

